Spektrum DER WISSENSCHAFT

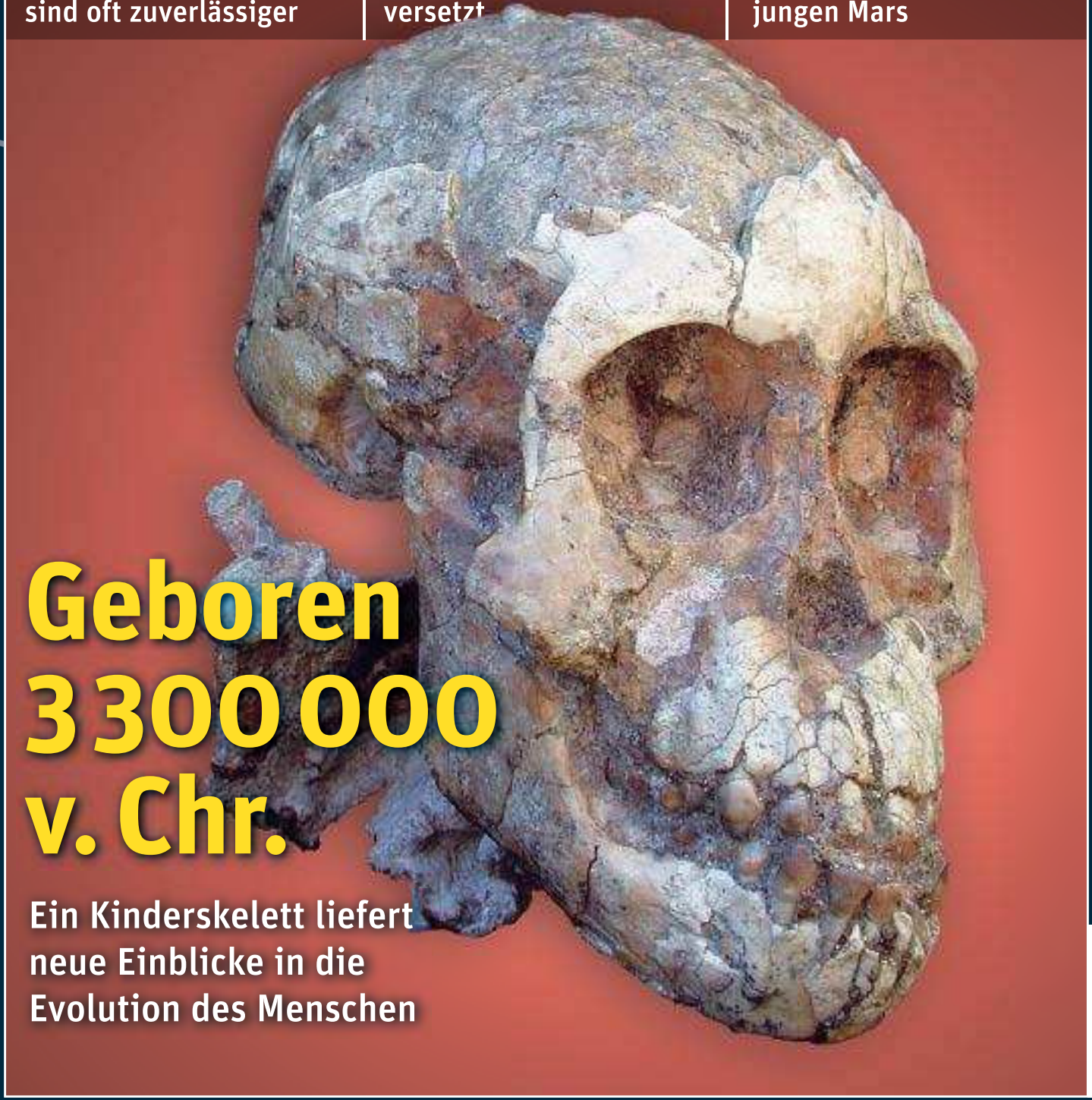
DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT
FEBRUAR 2007 2/07

TIERVERSUCHE
Alternativtests sind oft zuverlässiger

GEOPHYSIK
Wie das Klima Berge versetzt

PLANETEN
Viel Wasser auf dem jungen Mars



Geboren 3 300 000 v. Chr.

Ein Kinderskelett liefert neue Einblicke in die Evolution des Menschen

6,90 (D/A) · 13,50 sFr/Luxemburg 8,– €
D6179E
4 194058 406900 02

EDITORIAL

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Tierversuche und ihre Gegner

Vielleicht sind sie ja fast vorbei – die Zeiten, in denen selbst ernannte Tierschützer die Labors von Instituten oder Firmen stürmten und die dort gehaltenen Tiere befreiten (die dann in der Freiheit rasch verendeten). Jedenfalls hat man schon einige Zeit nichts mehr von spektakulären Aktionen dieses speziellen Typs von Gutmenschen gehört. Nicht, dass Tierversuchsgegner jemals völlig Unrecht gehabt hätten: Kein Tier sollte unnötig gequält und getötet werden. Eine Selbstverständlichkeit, möchte man meinen. Doch wenn man vom radikalen Standpunkt absieht, der grundsätzlich jedwede Form des Tierversuchs ablehnt – egal ob für Arzneimittelforschung, Kosmetikentwicklung, Agrochemie oder Grundlagenforschung –, es bleibt die knifflige Frage, was »unnötig« nun genau meint.

Dass diese Grenze nie völlig scharf zu ziehen ist, wird in unserem Artikel ab S. 60 ebenso evident wie die Tatsache, dass sie sich in den letzten Jahren stark verschoben hat – und zwar in die »richtige Richtung«. Denn dank neuer Technologien und intelligenterer Statistik und ohne den Standard der Qualitätssicherung zu mindern kommen die Firmen pro Testreihe mit deutlich weniger Tieren aus. Die Autoren unseres Beitrags sind selbst führend bei der Entwicklung von Alternativen zu Tierversuchen: Thomas Hartung von der Universität Konstanz leitet das »Europäische Zentrum zu Validierung von Alternativmethoden«, sein Koautor Alan M. Goldberg ist Direktor des Zentrums für Tierversuchsalternativen der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore.

Im Dezember wurde in Brüssel die neue Chemikalienrichtline »Reach« verabschiedet. Die Herausforderung, die hinter dieser lange umkämpften Neuordnung des Chemikalienrechts steht, ist beträchtlich. In Europa liegen für etwa 30 000 Altstoffe keinerlei Evaluierungen bezüglich ihres Gefahrenpotenzials vor. Dieses zu testen würde Jahrzehnte dauern und Millionen Versuchstiere verschlingen. Das will keiner, und das wird wohl auch nicht nötig sein: Nach den Untersuchungen von Goldberg und Hartung werden pro Prüfsubstanz bald nur noch sechs Tiere gebraucht – und nicht 150, wie noch in den 1970er Jahren.

Die neuen Ersatzverfahren sind, so berichten die beiden Forscher, nicht nur viel schneller und billiger, sondern oft sogar zuverlässiger. Doch werden auch sie Tierversuche vorläufig nicht vollständig überflüssig machen. Aber offenbar wird sich, davon sind unsere Autoren überzeugt, der »Tierverbrauch« um insgesamt 80 Prozent senken lassen – ein großer Schritt in eine humanere Welt, in der Menschen sichere Produkte hervorbringen wollen, ohne dass dies zu Lasten anderer Kreaturen geht. Auf die Produktsicherheit verlassen sich im Übrigen auch alle radikalen Tierversuchsgegner.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

Neues vom Alter

Oben auf und Down Under.

Wohin sind eigentlich all die Dinge verschwunden, die wir schon immer tun wollten? Wir haben sie in eine Schublade gesteckt mit der Aufschrift „Wenn ich einmal Zeit habe“. Dort warten sie darauf, dass man sie wieder hervorholt. So wie Waltraut Segebrecht das gemacht hat.

Ihr Wunsch war es schon immer, nach Australien zu reisen. Aber immer ist etwas dazwischen gekommen. So musste sie 77 Jahre alt werden, bis sie endlich ihren Traum verwirklichen konnte: Mit Rucksack und Mietwagen hat sie den fünften Kontinent in Begleitung eines jüngeren Bekannten erkundet.

Vor der Reise nach „Down Under“ stand der Umzug nach Mölln ins Augustinum. Es war ein bewusster Schritt, sagt Frau Segebrecht, um „einen sicheren Standpunkt“ zu haben für die Zukunft. Diesen „Standpunkt“ nutzt die mittlerweile 82-Jährige ausgiebig: für Reisen in alle Welt oder einfach nur für Spaziergänge in der Umgebung des Augustinum. Denn das hat sie sich vorgenommen: Die Zeit des Aufschiebens ist vorbei.

Informieren Sie sich jetzt direkt über Ihre Zukunft im Alter: 21-mal in Deutschland, Telefon 08 00/22 12 34 5 oder www.augustinum-wohnstifte.de

Selbstbestimmt leben. Gut betreut wohnen.

Augustinum

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Warum Gelächter ansteckt · Abheben mit Ultraschall · Antiker Computer · Speicheltest auf Übermüdung u. a.

13 **Bild des Monats**
Schleckermaul mit Riesenzunge

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Magnetisch angezogene Paare**
Spinkopplung als Ursache der Hochtemperatur-Supraleitung bestätigt

16 **Wirkstoffe aus dem Spiegelland**
Spiegelbilder natürlicher Moleküle als Arzneimittel der Zukunft?

19 **Neues über die ersten Galaxien**
Einblicke in die Zeit, als die frühesten Sternsysteme entstanden

THEMEN

▶ **22** ASTRONOMIE
Feuchte Vergangenheit eines Wüstenplaneten

▶ **32** TITELTHEMA ANTHROPOLOGIE
Kinderskelett von *Australopithecus*

42 MEDIZINISCHE INFORMATIK
Operations-Trainingssysteme in der Medizin

▶ **52** GEOWISSENSCHAFTEN
Das Klima kann auch Vorgänge tief im Erdinnern beeinflussen

▶ **60** TIERVERSUCHE
Alternativtests sind zuverlässiger

74 SCRAMJETS
Flugzeuge fürs All?

86 SYNTHETISCHE BIOLOGIE
Chip-Fabrikation als Vorbild künftiger Gentechnik

94 MOBILTELEFONE
Neue Plage durch Computerviren

108 ESSAY
Terroristenfahndung in Telefonnetzen?

KOMMENTAR

21 SPRINGERS EINWÜRFE
Doppelt hält nicht immer besser

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

SEITE 22

PLANETEN

Wasser auf dem jungen Mars

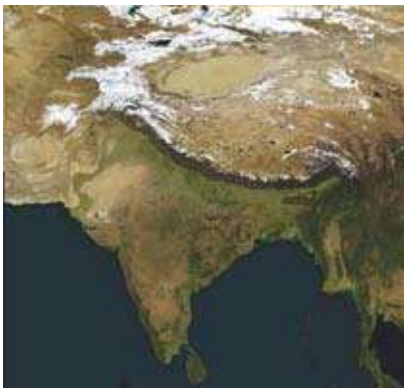
Messungen von Robotern und Raumsonden belegen: Lange Zeit hat Wasser große Teile der Oberfläche des heutigen Wüstenplaneten bedeckt

SEITE 42

MEDIZINISCHE INFORMATIK

Simulation von Operationen

Herzinfarktbehandlungen und diffizile Augenoperationen übt der angehende Arzt besser nicht am lebenden Patienten, sondern an einem eigens dafür entwickelten, computergenerierten virtuellen Ersatz



SEITE 52

GEOWISSENSCHAFTEN

Klima versetzt Berge

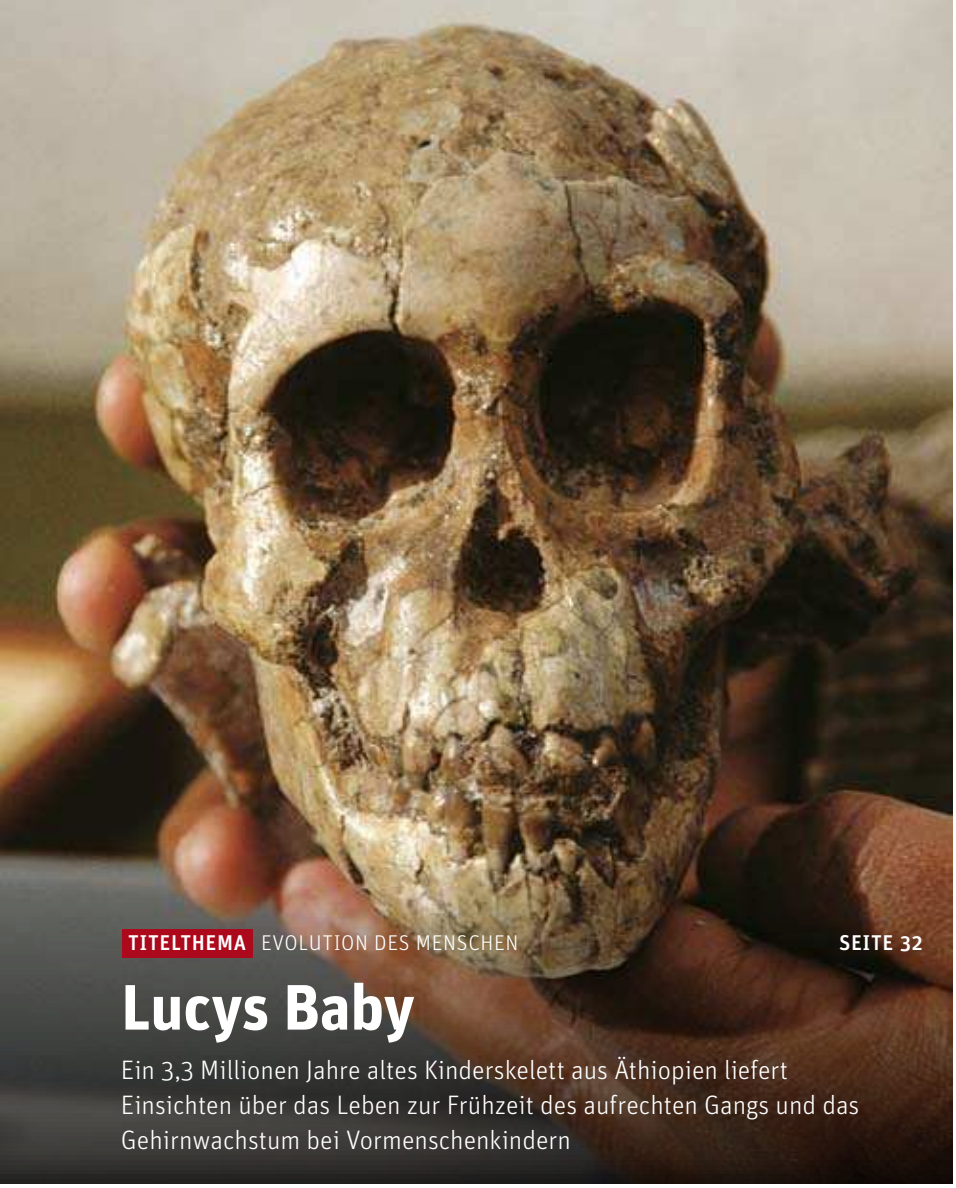
Eine neu entdeckte Beziehung zwischen Himalaya und Monsunniederschlägen zeigt, dass sich beide stärker beeinflussen als gedacht

SEITE 60

TIERVERSUCHE

Ersatzmethoden nicht nur zum Tierschutz

Neue Prüfverfahren mindern den Verbrauch und das Leid von Versuchstieren. Gleichzeitig sorgen neuartige Alternativtests für zuverlässigere Resultate



TITELTHEMA EVOLUTION DES MENSCHEN SEITE 32

Lucys Baby

Ein 3,3 Millionen Jahre altes Kinderskelett aus Äthiopien liefert Einsichten über das Leben zur Frühzeit des aufrechten Gangs und das Gehirnwachstum bei Vormenschenkindern

SEITE 74

SCRAMJETS

Flugzeuge im Orbit?

Gehört die Zukunft einem Düsenantrieb, der Maschinen nach horizontalem Start bis in den erdnahen Weltraum befördert?

SEITE 86

SYNTHETISCHE BIOLOGIE

Biofabrik der Zukunft

Systeme auf DNA-Basis sollen die Biotechnik revolutionieren: Vorbild sind Methoden der Chipherstellung

SEITE 94

MOBILTELEFONE

Angriff der Handy-Viren

Malware, bösartige Software ähnlich Computerviren, überfallen inzwischen auch programmierbare Mobiltelefone

WISSENSCHAFT IM …

73 **Rückblick:** Anti-Neutron entdeckt · Lohn auf Tastendruck · Ungesundes Studentenleben? u. a.

40 **Alltag:** Grüße von Vulcanus – Geothermie liefert Strom und Wärme

JUNGE WISSENSCHAFT

82 **Jugendsoftware-Preis der Klaus-Tschira-Stiftung**

REZENSIONEN

100 **Verborgene Universen** von Lisa Randall
Blaise Pascal von Jacques Attali
Die Kunst der Anatomie von Benjamin A. Rifkin, Michael J. Ackerman, Judy Folkenberg
Vergebliche Hoffnung von Michael Spöttel

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

105 **Jos Leys – Meister der Fraktalkunst** Kugelpackungen, die Exponentialfunktion, Chaos und Knoten

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial** Tierversuche und ihre Gegner

8 **Leserbriefe**

9 **Impressum**

104 **Preisrätsel**

114 **Vorschau**

TITELBILD

Im Alter von drei Jahren starb einst das *Australopithecus*-Mädchen. Kopf und Skelett sind hervorragend erhalten

Titelmotiv: Äthiopisches Nationalmuseum, Addis Abeba

Bis zum letzten Barrel

Ölpreis und Demokratie
November 2006

Der Artikel bietet eine gute Einsicht in die ökonomischen Funktionsmechanismen, deren sich Staaten bedienen, für die sich die Begriffe »Rentner- beziehungsweise Rentierstaaten« eingebürgert haben. Das Charakteristikum von Rentierstaaten ist, dass sich ihre Regierenden der lästigen Pflicht enthoben sehen, einen Staatshaushalt gegen Steueraufkommen ausbalancieren zu müssen. Ihre Einnahmen sind auf Grund von Exporten so hoch, dass solche Probleme nicht aufkommen. Wenn sie vor dem Übergang zu Rentierstaaten keine Demokratie entwickelt haben, neigen sie der bisherigen historischen Erfahrung nach nicht im Geringsten dazu, ihre meist feudalistischen, autokratischen oder diktatorischen Verfassungswirklichkeiten in diese Richtung zu ändern. In dieser Hinsicht erweckt der Artikel falsche Hoffnungen.

Das Greater Middle East, von dem der Verfasser spricht, ist allerdings ein Betrachtereuphemismus. Die dortigen Staaten befinden sich untereinander in vielfältig verschachtelten Spannungsverhältnissen, die lediglich durch ihre Mitgliedschaft in der Opec, die sie als bequemes Kartell zur Wahrung ihres Rentierstatus wahrnehmen, übertüncht werden. Ihre Innenpolitik zielt darauf ab, die Bevölkerung durch Tantiemen ruhigzustellen und aufbegehrende Kräfte mit menschenrechtsverletzenden Anklagen und Prozessen auszuschalten. Sie werden bis zum letzten Barrel ihre Energieressourcen zum höchstmöglichen Preis auf die Märkte zu bringen suchen.

Prof. em. Claus D. Kernig, Müllheim

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Ethik besser als Religion

Vom Glauben zum Wissen und zurück
Essay, Januar 2007

Wenigstens die naturwissenschaftlich gebildete Bevölkerung sollte langsam öffentlich dazu stehen, dass die Religionen, welche auch immer, allesamt auf Irrglauben beruhen.

Dennoch haben offenbar sehr viele Leute das Bedürfnis nach »nichtmateriellem Halt«. Wenn nun die Religionen als Lebensphilosophie-Fundament wegbrechen, womit soll dann das Vakuum gefüllt werden? Mit einer einfachen Grundethik: Wir sollten danach streben, dass es allen Menschen weltweit und auch der Natur mindestens einigermaßen gut geht. Die Welt wäre eine bessere, ohne Kriege und Umweltzerstörung.

Maurus Candrian, St. Gallen, Schweiz

Staatliche Alimentation

Inflation und Arbeitslosigkeit
Forschung aktuell, Dezember 2006

Eine bessere Erklärung für die anhaltend hohe Arbeitslosigkeit in Europa ist meines Erachtens der Einfluss staatlicher Alimentation nichtarbeitender Bevölkerungsteile. Viele »arbeitslos« Gemeldete sind nicht arbeitssuchend, sondern wollen lediglich die damit verbundenen Unterhaltszahlungen erhalten. Dabei spielt auch die Höhe dieser Transferzahlungen eine Rolle: Wenn ein Arbeitsloser Unterstützungszahlungen im Gegenwert von 800 Euro bezieht, lohnt es für ihn nicht, eine mit 900 Euro netto dotierte Stelle anzunehmen.

Geringer, aber durchaus vorhanden ist auch ein »motivationsdeckelnder« Effekt der Steuerprogression. Viele hoch qualifizierte Beschäftigte arbeiten lieber weniger und nehmen dafür einen geringeren Bruttolohn in Kauf, als ihnen potenziell offenstände, da wegen der Progression der Einkommenssteuer eine vergleichsweise starke Zusatzanstrengung lediglich zu einem unterproportional starken Anstieg des Nettogehalts führt. So besetzen Überqualifizierte Stellen, die auch mit geringer Qualifizierten besetzt werden könnten, und drängen Letztere aus der produktiven Tätigkeit.

Dr. Bernd Lehnemann, Frankfurt am Main

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Bernhard Epping, Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Ina Raschke, Claus-Peter Sesín

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, 20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01.01. 2006.
Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2007 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Brian Napack, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

Kein Kollaps auf der Osterinsel?

Dezember 2006

EINE BESIEDLUNG DER OSTERINSEL um 1200 n. Chr. statt um 800, wie bislang angenommen; der Niedergang der einst ausgedehnten Palmenwälder nicht auf Grund massenhafter Abholzung und Brandrodung, sondern als Folge einer rasant expandierenden Population der Polynesischen Ratte – die Thesen unseres amerikanischen Kollegen Terry L. Hunt regen die fachliche Diskussion an. Allerdings stehen unsere eigenen Forschungsergebnisse im Widerspruch dazu, denn sie zeigen, dass eben doch Menschen die Verantwortung für die Waldvernichtung trugen.

Hunt's kritische Überprüfung bisheriger Datierungen von Holzkohlen, also Überresten einstiger Feuerstellen, ist verdienstvoll. Doch lässt sich weder aus den bereinigten noch aus seinen neuen Daten von der Anakena-Bucht eindeutig der Zeitpunkt der Erstbesiedlung herauslesen. Selbst wenn Anakena der erste Landungsplatz war, muss es nicht der älteste Siedlungsort sein. Die Suche nach den ältesten Feuerstellen gleicht der nach der berühmten Stecknadel im Heuhaufen.

Dennoch postuliert Hunt nun eine Erstbesiedlung um das Jahr 1200. Um diese Zeit aber begann bereits das große Roden in weiten Teilen der Osterinsel. Das belegen die von uns ausgegrabenen verbrannten Baumstümpfe mit aufgehäuften pflanzlichen Brandbeschleunigern und integrierten Kochspuren, großflächige Holzkohle- und Ascheschichten sowie die Wurzelabdrücke der Bäume, die durch Hitzewirkung entstehen. Vor dieser Zeit aber wurde bereits ein ausgedehnter Gartenbau im Schutz der Palmenwälder betrieben – unter der Brandschicht entdeckten wir mit Stöcken gegrabene Pflanzlöcher zwischen den Bäumen. Davon gab es nach unseren Hochrechnungen Abermillionen. Das wiederum lässt auf eine Bevölkerung von einigen tausend Menschen vor 1200 schließen.

Wie ist es nun um die Annahme bestellt, die mit den Erstbesiedlern eingeschleppten Ratten hätten die Wälder durch Fressen der Samen, der so genannten Palmnüsse, vernichtet? Die vielfach negative Wirkung dieser Tiere auf andere Inselökosysteme ist unbestritten. Doch einerseits weisen keineswegs alle der von uns auf der Osterinsel gefundenen Nussschalen entsprechende Nagespuren auf. Andererseits gibt es in Chile ein Gebiet, in der bis heute *Jubaea*-Palmen gedeihen, obwohl der Waldboden dort mit angefressenen Nussschalen übersät ist. Am Innenhang des Rano Raraku, westlich der berühmten Moai-Steinbrüche, fanden wir zudem eindeutige Hinweise, dass sich dort nach der Zeit der Brandrodung der Palmenwald durchaus regeneriert hat – trotz der Ratten. Doch selbst wenn diese Tiere verhindert hätten, dass Samen keimen und zu neuen Bäumen heranwachsen konnten, wäre der inselweite Niedergang der Wälder nicht ohne menschlichen Einfluss zu erklären. Denn die Palmen sind sehr langlebig und etliche hätten noch bis lange nach der Ankunft der Europäer existieren können.

Sicher hat Terry Hunt damit Recht, dass die Errichtung der Steinskulpturen und kultischen Plattformen allein als Erklärung dafür nicht ausreicht, warum die Menschen Bäume in Massen fällten. Der in dem Artikel erwähnte Palmensaft als triftiger Grund für die Rodung des Waldes wurde von uns 2003 erstmals publiziert. Nach unseren Untersuchungen gab es kurz vor den Rodungen mehr als 16 Millionen Palmen auf der Insel, jede davon konnte bis zu mehreren hundert Liter wohlschmeckenden und nahrhaften Saft liefern. Trinkwasser hingegen gab es vermutlich nur in der Nähe der Kraterseen im Überfluss, während in anderen Gebieten Mangel herrschte.

TERRY L. HUNT

Millionen Palmen standen einst auf der Osterinsel. Über die Ursache ihres Niedergangs wird rege diskutiert.

In einem stimmen wir unserem Kollegen aber uneingeschränkt zu: Von dem plakativen Bild eines »Kollapses auf der Osterinsel« sollten wir uns lösen. Denn diese Kultur war vor Ankunft der Europäer einem vielfachen Wandel unterworfen, ohne dass sie abrupt zusammenbrach. Zum Beispiel entwickelten die Rapanui nach der Waldrodung eine in ihrem Ausmaß weltweit einmalige Bodenschutztechnik: Sie verteilten hochgerechnet etwa eine Milliarde faustgroße Steine auf den Gartenbauflächen, um die Erosion fruchtbaren Landes zu stoppen. Selbst die von den Europäern eingeschleppten Krankheiten, selbst Ausbeutung und Sklaverei vermochten die Bewohner der Osterinsel nicht völlig zu brechen. Ihre Kultur ist noch lebendig und hält für die Forschung noch manches Rätsel bereit.

Dr. Andreas Mieth und Prof. Dr. Hans-Rudolf Bork, Universität Kiel

PLANETOLOGIE

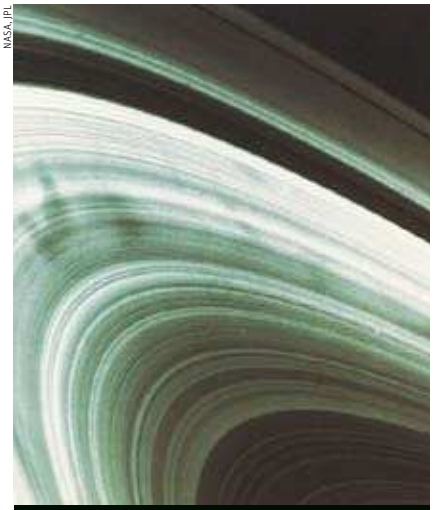
Saturns Speichen enträtselt?

Auf Voyager-Bildern von 1980/81, aber auch auf jüngsten Aufnahmen der Raumsonde Cassini tauchen gelegentlich speichenartige Schlieren in den Ringen von Saturn auf, die Astronomen vor ein Rätsel stellen. Nun schlagen Wissenschaftler um Geraint Jones vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau eine Lösung vor. Demnach sollen bei gewaltigen Gewittern auf Saturn Blitze auftreten, die 10 000-mal so stark sind wie auf der Erde und nach außen in die Ringe schießen, wo sie die Staubteilchen elektrisch aufladen.

Elektrisch geladene Partikel, die wegen ihrer gegenseitigen Abstoßung vorübergehend aus der Ringebene herausgedrückt werden und einen Schatten werfen, galten auch bisher schon als Erklärung für die bis zu 20 000 Kilometer langen und etwa 100 Kilometer breiten Schlieren in den Saturnringen. Offen blieb jedoch, woher die Ladung stammt. Die Gewittertheorie würde erklären, warum sich die Speichen innerhalb von Stunden bilden und genauso schnell wieder verschwinden. Außerdem ließe sich verstehen, weshalb vor allem der B-Ring betroffen ist. Dieser dreht sich nämlich genauso schnell wie Saturn selbst. Solange auf der Oberfläche des Planeten ein Gewitter wütet, würden seine Blitze also immer die gleiche Stelle im B-Ring durchzucken.

Geophysical Research Letters, Bd. 33, L21202

NASA, JPL



Stammen die rätselhaften Schlieren in den Saturnringen – hier in einer Aufnahme von Voyager 2 – von Gewittern?

ARCHÄOLOGIE

Verflucht sei der Manteldieb!

Als Servandus vor rund 1700 Jahren der Mantel gestohlen wurde, belegte er den Dieb mit einem Fluch. Die Verwünschung ritzte er zusammen mit den Namen von 18 oder 19 Verdächtigen in eine Bleiplatte, die Archäologen jetzt in Leicester (England) ausgruben. Dort heißt es: »Dem Gott Maglus übergebe ich den Übeltäter, der den Mantel von Servandus gestohlen hat. Silvester, Riomandus ... dass er ihn vor dem neunten Tag zerstöre, die Person, die den Mantel von Servandus gestohlen hat.« Spezialisten der Universität Leicester arbeiten noch an der genauen Übersetzung. Sie sei, so der an der Ausgrabung beteiligte Archäologe Richard Buckley, in einer Art Vulgärlatein verfasst.

Solche Tafeln finden sich in vielen römischen Tempelanlagen in Großbritannien. Wie sich aus den Namensformen der Verdächtigen und den entwendeten Gegenständen ableiten lässt, neigte besonders die einfache Bevölkerung dazu, Übeltäter zu verwünschen. Die Bedeutung des Fluchs aus Leicester liegt vor allem darin, dass die eingravierten Namen etwas über die Bevölkerungsstruktur der Stadt preisgeben. So wohnten dort im 2. oder 3. nachchristlichen Jahrhundert Menschen sowohl mit rein römischen (Silvester) oder keltischen Namen (Riomandus) als auch mit römischen Namen, die bevorzugt in keltisch sprechenden Regionen vorkamen (Regalis).

Presseinfo der Universität Leicester vom 29. 11. 2006

TRUSTEES OF THE HAVERFIELD BEQUEST

Diese antike Bleitafel enthält Verwünschungen eines mutmaßlichen Diebs.

HIRNFORSCHUNG

Warum Gelächter ansteckt

Wieso müssen wir automatisch mitlachen, wenn andere losprusten, selbst wenn wir den Grund der Heiterkeit nicht kennen? Bisher war nur bekannt, weshalb wir uns von positiven oder negativen Gesichtsausdrücken anstecken lassen. Verantwortlich dafür sind so genannte Spiegelneurone im prämotorischen Kortex, welche die Bewegungen – einschließlich Gebärden und Mienenspiel – unseres Gegenübers auf neuronaler Ebene nachvollziehen. Damit versetzen wir uns in andere Menschen hinein. Jetzt haben Forscher vom University College London nachgewiesen, dass dieses reflexartige Mitfühlen auch nichtvisuelle Reize einschließt.

Bei ihrem Experiment spielten Jane E. Warren und Kollegen den Versuchspersonen Lautäußerungen abwesender Menschen vor, die verschiedene Emotionen wie Triumph, Freude, Angst oder Ekel ausdrückten. Gleichzeitig beobachteten sie mittels funktioneller Magnetresonanztomografie, welche Hirnregionen darauf ansprachen.

Wie sich zeigte, feuerten die altbekannten Areale mit den Spiegelneuronen. Interessant ist, dass dabei eine Bewertung stattfand. Positive Gefühlsausdrücke aktivierten den prämotorischen Kortex deutlich stärker als negative. Die Forscher vermuten dahinter einen neuronalen Mechanismus zur Stärkung sozialer Bindungen. Wir reagieren eben bevorzugt auf das Gute in anderen.

Journal of Neuroscience, 13. 12. 2006, S. 13067

PALÄANTHROPOLOGIE

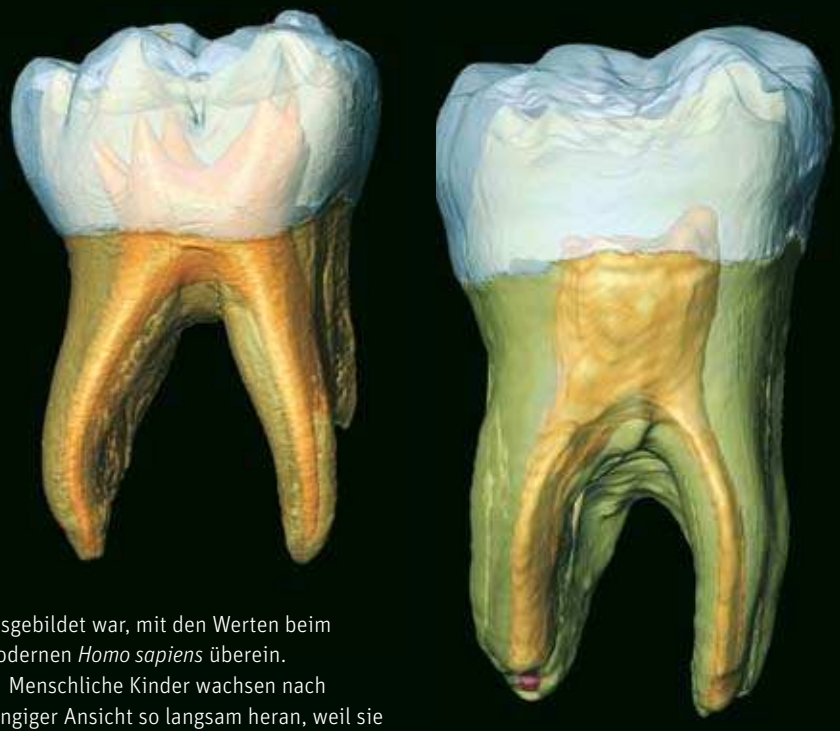
Was Zähne erzählen

Auch Neandertaler hatten eine lange Kindheit. Das haben Forscher um Christopher Dean vom University College London jetzt herausgefunden. Bisher war unklar, ob die verzögerte Adoleszenz, die heutige Menschen von anderen Primaten unterscheidet, auch unseren engsten Verwandten unter den frühen Hominiden bereits auszeichnete. Aufschluss gaben nun hochauflösende Computertomogramme, die erstmals die innere Feinstruktur fossiler Zähne zeigen. Bei älteren Untersuchungen ging es nur um das äußere Erscheinungsbild.

Dean und seine Kollegen untersuchten einen bleibenden und einen Milchzahn von Neandertalern aus Frankreich. Dabei orientierten sie sich vor allem an der »Neonatallinie«, die sich bei der Geburt im Zahnschmelz abzeichnet, analysierten aber auch andere Spuren des Zahnwachstums. Insgesamt fanden sie mehrere wichtige Gemeinsamkeiten des Neandertalers mit dem heutigen Menschen. So waren die Zähne bei der Geburt gleich weit entwickelt. Außerdem stimmen sowohl das Alter, in dem sie das Zahnfleisch durchstießen, als auch der Zeitpunkt, zu dem der Zahnschmelz voll ausgebildet war, mit den Werten beim modernen *Homo sapiens* überein.

Menschliche Kinder wachsen nach gängiger Ansicht so langsam heran, weil sie Zeit brauchen, sich die besonderen intellektuellen und sozialen Fähigkeiten unserer Spezies anzueignen. Die neuen Ergebnisse sprechen somit für ein ähnlich hohes geistiges Niveau beim Neandertaler.

Nature, 22. 11. 2006, S. 748



LUCA BONDIOLI UND ARNAUD MAZURIER

Die virtuelle 3-D-Rekonstruktion erlaubt einen Blick in das Innere eines bleibenden und eines Milchzahns von Neandertalern aus La Chaise (Frankreich).

PHYSIK

Abheben mit Ultraschall

Frei im Raum zu schweben – diese Erfahrung machten kürzlich Ameisen, Bienen, Spinnen, Käfer und kleine Fische in der nordwestchinesischen Stadt Xi'an. Forscher am dortigen Polytechnikum hoben die Tiere mittels Ultraschall in die Luft. Zuvor hatten sie den Trick schon mit schweren Wolframkugeln probiert. Er basiert auf dem Druck der Schallwellen und ist theoretisch seit den 1930er Jahren bekannt. Am besten funktioniert die Levitation, wenn die Dimensionen des Objekts und die Wellenlänge der Schallschwingungen ungefähr übereinstimmen. Die Forscher um Wen-Jun Xie benutzten einen magnetischen Generator, der Wellen von ein bis zwei Zentimeter Länge ausstieß.

Körperlich litten die Tiere – abgesehen von den Fischen – nicht erkennbar unter der Prozedur. Sie wurden, wie Xie vermutet, allenfalls in der Körpermitte leicht zusammengedrückt, während die Schallwellen an ihnen abprallten. Allerdings waren sie ob der ungewohnten Flugerfahrung verständlicherweise verstört und versuchten – vergeblich – mit hektischen Bewegungen zu entfliehen.

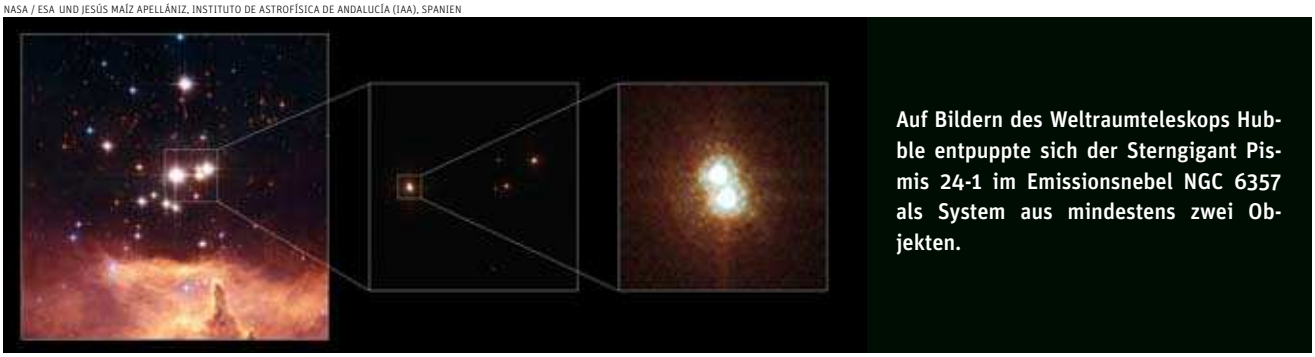
Niederländische Physiker von der Universität Nimwegen hatten 1997 bereits Frösche mittels Magnetkraft in der Luft schweben lassen. Beim Menschen dürften beide Methoden kaum funktionieren: Er ist einfach zu schwer und für die Levitation mit Ultraschall auch zu groß – Luftschwingungen der benötigten Wellenlängen lägen im hörbaren Bereich und wären in der erforderlichen Stärke wohl nicht auszuhalten.

Applied Physics Letters, Bd. 89, Artikel-Nr. 214102

WEN-JUN XIE, NORTHWEST POLYTECHNIC UNIVERSITY (NWPU), CHINA

Auch eine Ameise kann schweben – zwischen den Polschuhen eines magnetischen Ultraschallgenerators.

NASA / ESA UND JESÚS MAÍZ APELLÁNIZ, INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA (IAA), SPANIEN



Auf Bildern des Weltraumteleskops Hubble entpuppte sich der Sterngigant Pismis 24-1 im Emissionsnebel NGC 6357 als System aus mindestens zwei Objekten.

ASTRONOMIE

Duo statt Riesenstern

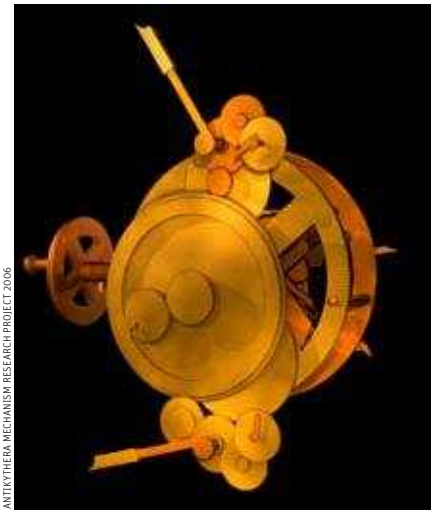
■ Pismis 24-1 im Sternbild Skorpion galt bisher als aussichtsreichster Anwärter auf den Schwergewichtstitel in der Galaxis. 8000 Lichtjahre von der Erde entfernt im Emissionsnebel NGC 6357 gelegen, schien er 200 bis 300 Sonnenmassen auf die Waage zu bringen – weit mehr als jeder andere Kandidat. Doch nun hat eine hoch aufgelöste Aufnahme, die Astronomen um Jesús Maíz Apellaníz vom Instituto de Astrofísica de Andalucía in Spanien mit dem Weltraumteleskop Hubble anfertigten, den Riesenstern als Duo enttarnt.

Hinter der Suche nach stellaren Rekordhaltern steckt mehr als sportlicher Ehrgeiz. Die Astronomen wüssten gerne, wie schwer Sterne maximal werden können. Der Theorie nach sollte die Obergrenze, abhängig von Eigenschaften wie der Zusammensetzung, Rotationsgeschwindigkeit und dem Magnetfeld des Objekts, bei etwa 120 bis 300 Sonnenmassen liegen. Solche Giganten sind allerdings sehr selten. Unter 18 000 Sternen vom Format unserer Sonne entsteht nur einer mit der 65-fachen Masse. Zudem leben die Leichtgewichte mit bis zu 10 Milliarden Jahren gut 3000-mal so lang.

Pressemitteilung der ESA vom 27. 12. 2006

TECHNIK

»Computer« aus der Antike



ANTIKYTHERA MECHANISM RESEARCH PROJECT 2006

■ Schwammtaucher bargen es 1901 aus einem antiken Schiffswrack vor der griechischen Insel Antikythera: ein mechanisches Räderwerk, das heute als ältester Analogrechner der Welt gilt – in seiner Komplexität vergleichbar mit astronomischen Uhren des Mittelalters. Der »Antikythera-Mechanismus« ist aus Bronze gefertigt und stammt aus der Zeit zwischen 150 und 100 v. Chr. Erhalten sind nur stark korrodierte Einzelteile, die sich ursprünglich in einem hölzernen Kasten befanden. Jetzt haben Forscher

Das Räderwerk des »Antikythera-Mechanismus« ließ sich nun weit gehend rekonstruieren.

des Antikythera Mechanism Research Project um Tony Freeth und Mike Edmunds von der Universität Cardiff das Gerät mittels Computertomografie untersucht. Dabei konnten sie die Menge der entzifferbaren Inschriften mit Angaben zur Bedienung verdoppeln und neue Zahnräder aufspüren; deren Zahl stieg damit auf 37. Auch eine Rekonstruktion ließ sich anfertigen.

Wie man schon seit den 1950er Jahren weiß, war der Antikythera-Mechanismus im wesentlichen ein Kalenderrechner. Zudem wurde vermutet, dass er eine ungefähre Voraussage von Mond- und Sonnenfinsternissen erlaubte. Die neuen Untersuchungen haben das bestätigt. Wie sie ferner ergaben, ließen sich mit der Apparatur auch Feinheiten in der Bewegung des Mondes am Himmel nachvollziehen, die daher rühren, dass dessen Umlaufbahn schwach elliptisch ist.

Nach den Inschriften könnte das Gerät sogar Planetenbahnen berechnet haben. Das wäre eine Sensation; denn dann hätten seine Erbauer womöglich über ein heliozentrisches Weltbild verfügt.

Nature, 30. 11. 2006, S. 587

MEDIZIN

Übermüdungstest

■ Übermüdete Kraftfahrer verursachen immer wieder tödliche Unfälle. Doch wie soll man hieb- und stichfest kontrollieren, ob jemand ausgeschlafen ist oder nicht? Forscher um Paul J. Shaw von der Washington-Universität in St. Louis (Missouri) haben nun einen Baustein für einen Speicheltest auf Schläfrigkeit entdeckt. Sie stellten fest, dass bei stark übermüdeten Taufliegen der Anteil des Enzyms Amylase im Speichel steigt. Dasselbe zeigte sich auch beim Menschen. Der Grund dafür ist allerdings unbekannt.

Aufgabe der Amylase ist es, die Stärke im Mund in Oligosaccharide wie Dextrin oder Maltose aufzuspalten, weshalb etwa Brotstückchen nach langem Kauen süß schmecken. Bisher war nur bekannt, dass die Konzentration des Enzyms bei Stress steigt.

Das einmalige Messen des Amylasespiegels im Speichel genügt freilich nicht, um Übermüdung zu diagnostizieren, denn sein Anstieg mit dem Schlafbedürfnis ist individuell verschieden. In Relation zu anderen Speichelkomponenten und zusammen mit weiteren Biomarkern könnte Shaws Ergebnis aber einen zuverlässigen Test ergeben.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 26. 12. 2006, S. 19913

Mitarbeit: Anke Römer und Stephanie Hügler

Schleckermaul mit Riesenzunge

Mit 8,5 Zentimetern ist die Zunge der Blütenfledermaus *Anoura fistulata,* die Nathan Muchhala von der Universität Miami unlängst im Nebelwald Ecuadors entdeckte, gut 1,5-mal so lang wie ihre Besitzerin – ein Rekord unter den Säugern, der im gesamten Tierreich nur vom Chamäleon überboten wird. Hier schleckt das Flattertier mit dem Riesenorgan Zuckerwasser aus einem Reagenzglas. In freier Natur ist *A. fistulata* auf die ungewöhnlich lange Blütenröhre des Glockenblumengewächses *Centropogon nigricans* spezialisiert, das sie zugleich bestäubt – der erste bekannte Fall einer Koevolution zwischen Fledermaus- und Pflanzenart. Um die Zunge unterzubringen, faltet das Tier sie und zieht sie durch den Rachen bis tief in den Brustkorb zurück, wo eine spezielle Röhre das Organ aufnimmt.

MURRAY COOPER UND NATHAN MUCHHALA, UNIVERSITY OF MIAMI

HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITUNG

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

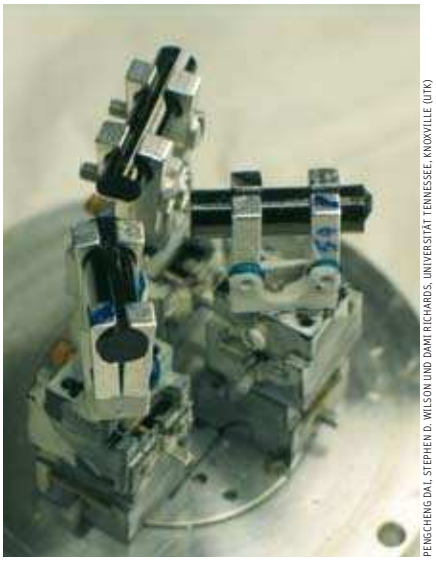
Magnetisch angezogene Paare

Noch immer ist der Mechanismus der Hochtemperatur-Supraleitung nicht endgültig geklärt. In einem neuen Experiment konnte die favorisierte Theorie jedoch weiter punkten.

Von Emanuela Buyer

Einmal angeregt, kann ein Strom in Supraleitern von selbst zeitlich unbegrenzt fließen. Diese Entdeckung machte 1911 Heike Kamerlingh-Onnes bei Versuchen an Quecksilber, das bis nahe an den absoluten Temperatur-Nullpunkt (–273,15 Grad Celsius) heruntergekühlt war. Wie sich später zeigte, tritt der Effekt auch bei einigen anderen Metallen und Legierungen auf – aber stets nur unterhalb von –250 Grad Celsius.

Drei geschliffene PLCCO-Kristalle sind für die Neutronenstreuung in Aluminiumhalter eingespannt. Über Präzisionswinkelmesser lassen sie sich so ausrichten, dass ihre Achsen exakt in dieselbe Richtung zeigen. Damit sieht der Neutronenstrahl die drei Proben, als wäre es eine einzige. Dieser Trick sorgt für eine stärkere Streuung und damit eine höhere Empfindlichkeit und Genauigkeit der Messung.



PENGCHENG DAI, STEPHEN D. WILSON UND DAMI RICHARDS, UNIVERSITÄT TENNESSEE, KNOXVILLE (UTK)

Erst 1986 entdeckten Georg Bednorz und Karl Alex Müller am IBM-Forschungszentrum Zürich eine Klasse kupferhaltiger keramischer Materialien mit einer sehr viel höheren »Sprungtemperatur«: Sie werden schon ab –140 Grad Celsius supraleitend. Weil in diesem Fall Kühlung mit flüssigem Stickstoff genügt, sind solche »Kuprate« in ihrer technischen Anwendung bedeutend billiger als normale Supraleiter.

Aber nicht nur in der Sprungtemperatur unterscheiden sie sich von ihren metallischen Gegenstücken; auch der Mechanismus muss ein anderer sein. Deshalb stricken Theoretiker fleißig an Modellen, um die Hochtemperatur-Supraleitung zu erklären. Die Experimentatoren wiederum unterwerfen die jeweiligen Erklärungsversuche dem Praxistest.

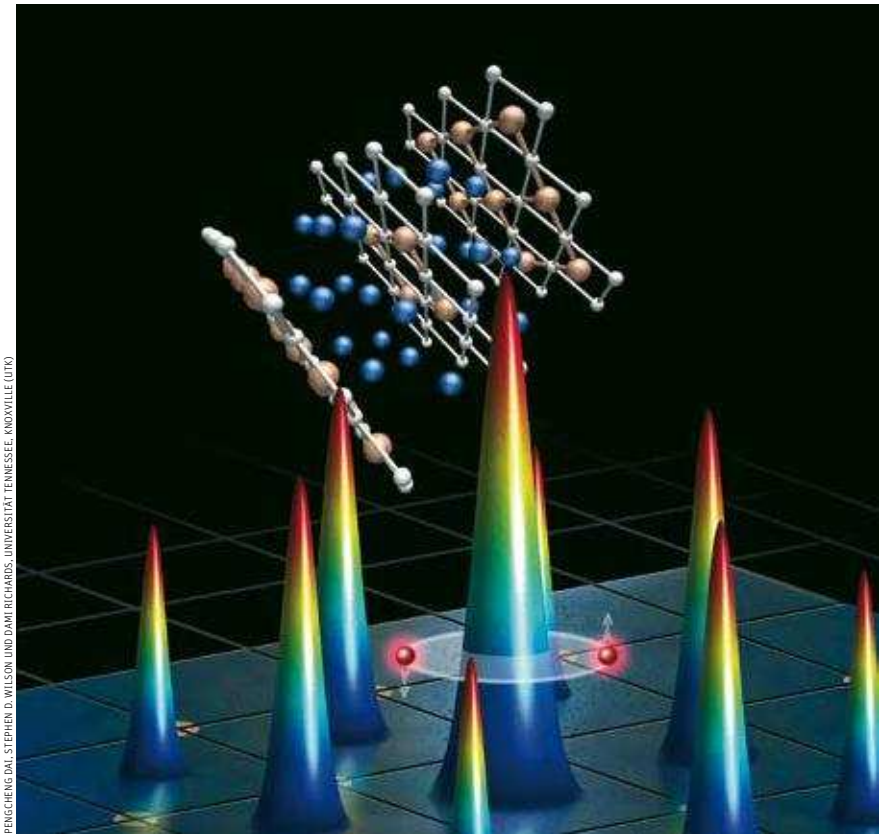
Zu diesem Zweck fahnden sie in den verschiedenen Kupraten nach besonderen Eigenschaften, die zum vorgeschlagenen Mechanismus passen. Dabei haben sie im supraleitenden Zustand unter anderem verräterische magnetische Anregungen entdeckt, wie sie nach dem aussichtsreichsten Modell durch die Materialproben fließen sollten. Allerdings gibt es zwei Klassen von Kupraten, und der Nachweis gelang zunächst nur bei der einen. Vor Kurzem hatten Physiker um Pengcheng Dai und Stephen Wilson von der Universität von Tennessee in Knoxville nun auch bei einem Vertreter der anderen Klasse Erfolg *(Nature, Bd. 442, S. 59)*.

Im Jahr 1972 lieferten John Bardeen, Leon Cooper und John Robert Schrieffer die Erklärung für die Supraleitung in Metallen. Demnach verursacht ein Leitungselektron eine kurzfristige Verzerrung im Atomgitter, durch die ein weiteres Elektron angezogen wird. Dieses bildet mit dem ersten dann ein so genanntes Cooper-Paar, das dank seiner besonderen quantenmechanischen Eigenschaften kollisions- und damit reibungslos durch den Leiter gleiten kann.

Der Mechanismus setzt allerdings voraus, dass das Gitter sehr langsam schwingt, was nur bei extrem tiefen Temperaturen der Fall ist. In Hochtemperatur-Supraleitern kann es auf diese Weise also nicht zur Paarbildung kommen. Eines scheint jedoch sicher: Auch in diesen Materialien müssen zwei Elektronen zusammenfinden. Die Frage ist nur, wie. Nach der allgemein favorisierten Theorie sorgen magnetische Kräfte für den Zusammenhalt.

Anders als supraleitende Metalle sind die Kuprate bei Raumtemperatur Nichtleiter. Die am wenigsten gebundenen, äußersten Elektronen des Kupfers befinden sich in diesem Fall im Zwiespalt. Generell streben sie nach dem Zustand geringster Energie. Gemäß der Heisenberg'schen Unschärferelation lässt die räumliche Fixierung eines Teilchens dessen Impuls ansteigen. Würden die Elektronen sich frei bewegen, wäre ihre kinetische Energie also niedriger als im ortsfesten Zustand, in dem sie, anschaulich gesprochen, rapide hin- und herschwingen. Bei einem Ausreißversuch müssten sie sich jedoch ihren Kollegen auf benachbarten Plätzen nähern, was eine erhöhte Coulomb-Abstoßung zur Folge hätte. Die Elektronen der Kuprate, bei denen dieser Effekt überwiegt, bleiben darum lieber an Ort und Stelle.

Es gibt jedoch Möglichkeiten, das Material leitend zu machen. Dazu kann man etwa Elektronen entfernen und so freie Plätze für die Wanderung schaffen. Aber auch der umgekehrte Trick funktioniert. Wenn man Elektronen hinzufügt,



PENGCHENG DAI, STEPHEN D. WILSON UND DAMI RICHARDS, UNIVERSITÄT TENNESSEE, KNOXVILLE (UTK)

Die neu entdeckten magnetischen Anregungen im Hochtemperatur-Supraleiter PLCCO sind hier als Resonanzspitzen auf einer CuO_2-Gitterebene dargestellt. Angezogen durch magnetische Kräfte umkreist ein Elektronenpaar die Hauptresonanz. Im Hintergrund ist die grobe Struktur des Kristalls zu erkennen; die weißen Kugeln stehen für Sauerstoff, die lachsfarbenen für Kupfer und die blauen für das Seltenerdmetall Praseodym. Der besseren Übersicht halber wurden die Sauerstoff-, Lanthan- und Ceratome in den Räumen zwischen den CuO_2-Ebenen weggelassen.

werden sie überall gleich stark abgestoßen, weil sie keinen angestammten Platz haben. Damit gibt es für sie keinen Grund mehr, lokalisiert zu bleiben.

Das Entfernen oder Hinzufügen von Ladungsträgern eröffnet zugleich einen Mechanismus zur Paarbildung. Elektronen haben nämlich eine Eigenschaft namens Spin. Dadurch kann man sie sich als winzige Stabmagnete vorstellen. In einem Kuprat stehen die Spins der äußeren Elektronen des Kupfers im Normalfall antiparallel. Dadurch kompensieren sich ihre magnetischen Momente paarweise. Bei einer Änderung der Elektronenzahl wird diese Ordnung jedoch gestört.

Bewegen sich nun Elektronen durch den Leiter, ziehen sie eine Spur von Magnetismus hinter sich her, weil in ihrem Fahrwasser die benachbarten Elementarmagnete umklappen. Physiker sprechen von Spinfluktuationen. Der Theorie nach sollten die Wechselwirkungen zwischen den Spins schon bei mäßig tiefen Temperaturen so stark sein, dass ein wanderndes Elektron durch die lokal begrenzten magnetischen Kräfte, die es induziert, ein zweites anziehen kann, das dann mit ihm ein Paar bildet.

Beweis mit Neutronen

Spinfluktuationen lassen sich durch Streuung von Neutronen nachweisen. Dafür bringt man das zu untersuchende Kuprat in einen Strahl dieser Kernbausteine, der nach Richtung und Impuls genau definiert ist. Da die starken Coulomb-Kräfte keine Auswirkung auf die Flugbahn der ungeladenen Teilchen haben, kommt der Einfluss der viel schwächeren magnetischen Felder zum Tragen. Eine starke Ablenkung, die bei bestimmter Einfallrichtung des Strahls und Energie der Neutronen auftritt – Physiker sprechen von Resonanz –, zeigt die Existenz einer magnetischen Störung und die Richtung, in welche sie sich bewegt.

In Kupraten mit Elektronenmangel ließen sich schon vor einigen Jahren solche Resonanzen feststellen. Um als Hinweis auf den Mechanismus der Supraleitung gelten zu können, müssen sie aber auch in den Materialien mit überschüssigen Elektronen auftreten. Dies konnte nun die erwähnte Gruppe aus Tennessee nachweisen. Ausschlaggebend für ihren Erfolg war der in diesem Jahr fertig gestellte Hochfrequenz-Isotopen-Reaktor SNS des US-Nationallabors Oak Ridge, der dank seiner hohen Pulsdichte genauere Daten liefert als frühere Neutronenquellen.

Als Untersuchungsmaterial wählten die US-Forscher ein Kuprat der Zusammensetzung $Pr_{0,88}LaCe_{0,12}CuO_{4-\delta}$ (kurz PLCCO). Es enthält außer Kupfer und Sauerstoff die Seltenerdmetalle Praseodym, Lanthan und Cer. Um einen Elektronenüberschuss zu erzeugen, wurden ihm Sauerstoffatome entzogen (»Reduktion«), sodass die zu deren Bindung benötigten Elektronen zurückblieben. Das resultierende PLCCO verliert zwar erst bei –249 Grad Celsius seinen elektrischen Widerstand, ist aber dennoch seiner Struktur nach ein Hochtemperatur-Supraleiter.

An ihm konnten Dai und Wilson per Neutronenstreuung die erhofften Spinfluktuationen messen. Dabei bestätigte sich zugleich ein Zusammenhang zwischen der Resonanzenergie des Neutronenstrahls und der Sprungtemperatur des untersuchten Hochtemperatur-Supraleiters. Andere Wissenschaftler hatten diese Proportionalität bei Kupraten mit Elektronendefizit gefunden und als Gerade dargestellt: Der Messpunkt der Gruppe aus Tennessee fiel gleichfalls auf diese Linie.

Für Pengcheng Dai beweist das die Existenz eines fundamentalen Zusammenhangs zwischen Spinfluktuationen und Supraleitung. Offen bleibt jedoch, welches von beiden die Ursache und welches die Wirkung ist. Rufen die gemessenen Spinfluktuationen tatsächlich die Supraleitung hervor oder verhält es sich vielleicht umgekehrt? Verursachen also in Wahrheit die durch einen anderen Mechanismus gepaarten Elektronen nachträglich die magnetischen Anomalien? Auf diese Frage gibt es leider noch keine Antwort.

Emanuela Buyer hat Physik studiert und ist derzeit Referendarin in Singen.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Wirkstoffe aus dem Spiegelland

Vom Schlankheitsmittel bis zum Medikament gegen das Erblinden im Alter reicht das Spektrum einer neuen Klasse von Wirkstoffen, die Spiegelbilder natürlicher Moleküle sind. Ihr Vorteil: Weder lösen sie eine Immunreaktion aus noch werden sie vom Körper abgebaut.

Von Thorsten Braun

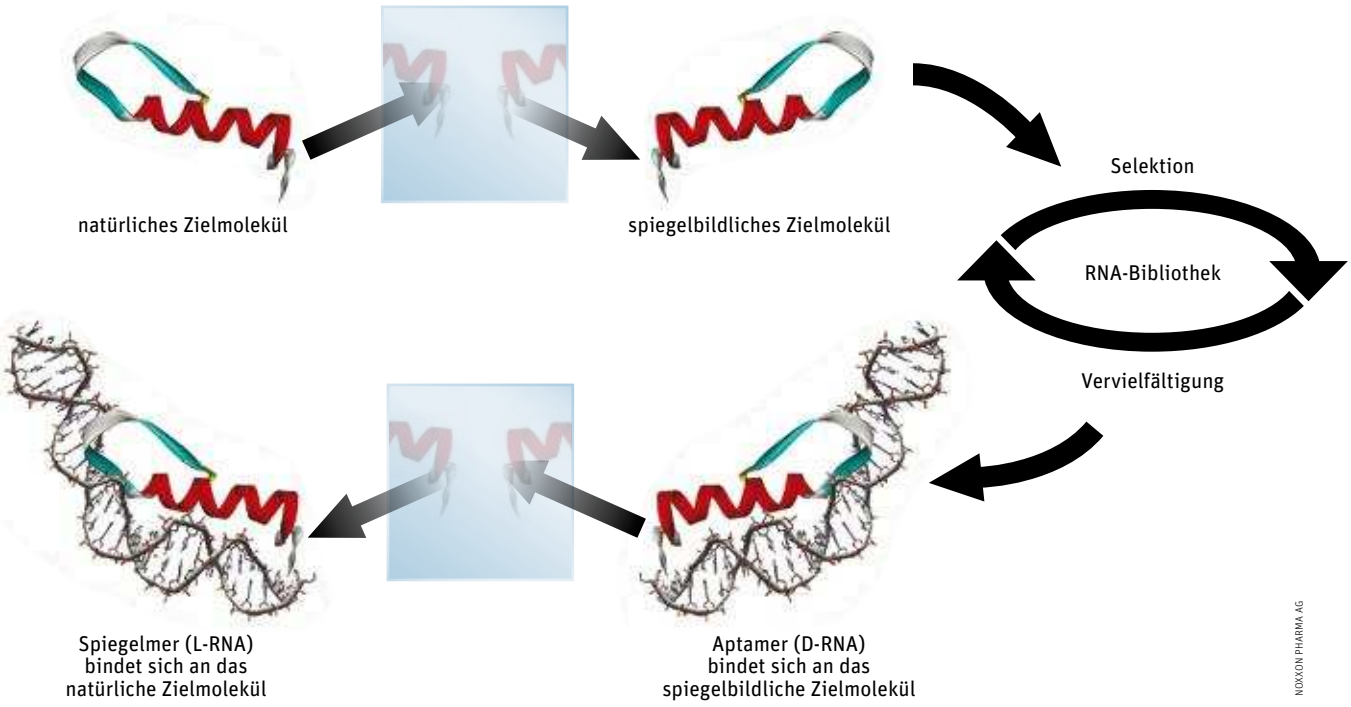
Von wirksamen Medikamenten gegen Übergewicht erhofft sich die Pharmabranche Umsätze in Milliardenhöhe. Im Frühjahr vergangenen Jahres sicherte sich deshalb die US-Firma Pfizer die Rechte an einem Wirkstoff, den die Noxxon Pharma AG aus Berlin entwickelt hat. NOX-B11, so sein Kürzel, blockiert das Hormon Ghrelin, das in der Magenschleimhaut produziert wird und den Appetit anregt.

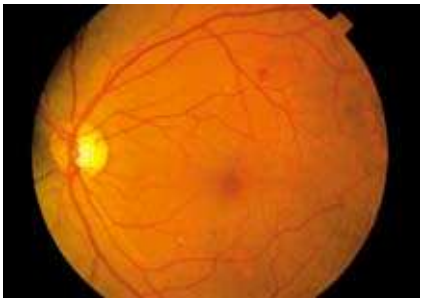
»Testpersonen, denen Ghrelin verabreicht wurde, aßen bis zu dreißig Prozent mehr«, sagt Noxxon-Chef Sven Klussmann. NOX-B11 soll diesen appetitsteigernden Effekt des natürlichen Hormons neutralisieren. »Mäuse, die unseren Wirkstoff erhielten«, berichtet Klussmann, »verloren bis zu zehn Prozent Gewicht.« Zusammen mit Pfizer will Noxxon die Substanz zur Marktreife entwickeln. Ende dieses Jahres sollen erste klinische Tests beginnen.

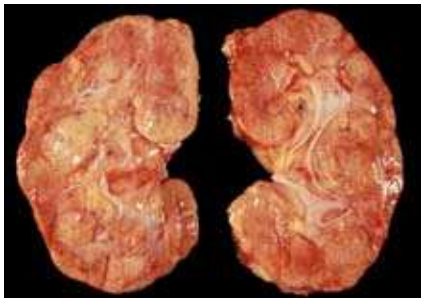
NOX-B11 ist ein künstliches Molekül und gehört zur Klasse der Aptamere. Darunter versteht man RNA- oder DNA-Ketten aus 25 bis 35 Nucleotiden, die als viel versprechende Arzneikandidaten gelten. Sie können andere Moleküle zielsicher erkennen und blockieren und gleichen damit den Antikörpern. Aber anders als diese »lösen sie keine Abstoßungsreaktionen aus und lassen sich mit einem biochemischen Routineverfahren einfach produzieren«, erklärt Michael Famulok, Professor für Biochemie an der Universität Bonn, der selbst an Aptameren forscht.

Zur Gewinnung dient der Selex-Prozess (englisch für *systematic evolution of ligands by exponential amplification*), den mehrere US-Wissenschaftler Ende der 1980er Jahre entwickelt haben. Dabei bringt man eine Lösung aus bis zu einer Billiarde kurzer, zufällig erzeugter RNA- oder DNA-Stücke in Kontakt mit dem Zielmolekül, das auf einem Träger fixiert ist. Diejenigen Schnipsel, die haften bleiben, werden dann per Polymerasekettenreaktion vervielfältigt und weiteren Bindungstests unterworfen. So lässt sich schließlich ein Nucleotidstrang finden, der am besten zum Zielmolekül passt.

Die auf diese Weise isolierten Aptamere haben allerdings auch Nachteile. So gleichen sie natürlichen Nucleinsäurefragmenten im Körper und werden wie diese enzymatisch abgebaut. Selbst wenn das nicht passiert, scheiden die Nieren die relativ kleinen Moleküle, bevor sie ihre Wirkung richtig entfalten können, schon wieder aus. Bislang müssen Aptamer-Bausteine deshalb nachträglich modifiziert werden. Dabei versieht man die Nucleotide chemisch mit Anhängseln, sodass die körpereigenen Scheren nicht mehr ansetzen können. Um zu ver-







BEIDE FOTOS: AG. FOCUS / SPL

Noch in diesem Jahr sollen klinische Tests mit zwei Spiegelmeren beginnen. Das eine dient zur vorbeugenden Behandlung der diabetischen Retinopathie, die bei Zuckerkranken auftritt und Blutungen sowie Blutgefäßwucherungen im Auge auslöst (links). Das andere soll gegen allergische Entzündungen der Niere beim Lupus nephritis (rechts) helfen.

hindern, dass das Aptamer durch die feinen Maschen der Nierenfilter rutscht, wird es zusätzlich an ein rund doppelt so großes Polyethylenglykol-Molekül gekoppelt.

»Vor allem das Modifizieren der Nucleotide ist sehr Zeit raubend, da bei jeder einzelnen Veränderung die Gefahr besteht, dass das Aptamer nicht mehr an das Zielmolekül andockt«, gesteht Famulok. Immerhin hat das erste auf diese Weise abgewandelte Aptamer im Mai vergangenen Jahres den Sprung auf den deutschen Arzneimarkt geschafft: Unter dem Namen Macugen von den US-Firmen Pfizer und Eyetech Pharmaceuticals vertrieben, hilft es bei der altersabhängigen Makuladegeneration, einer bislang nicht behandelbaren Augenkrankheit.

Die Wissenschaftler von Noxxon haben sich eine andere Methode einfallen lassen, um den Aptamer-Abbau im Körper zu verhindern. Im Mittelpunkt steht dabei eine pfiffige Idee: Von vielen Molekülen existieren zwei verschiedene Formen, die sich wie Bild und Spiegelbild zueinander verhalten. Das gilt auch für Nucleotide, und diesen Umstand macht sich Noxxon zu Nutze. »Wir erzeugen einfach spiegelbildliche Versionen der RNA-Bausteine und bauen damit Aptamer-Spiegelbilder auf«, erläutert Klussmann.

Diese Spiegelmere, wie er die neue Stoffklasse nennt, werden von natürlichen Enzymen nicht erkannt und deshalb auch nicht abgebaut. Trotzdem sind sie wie Aptamere fähig, sich an Zielmoleküle anzulagern – ähnlich einer linken Hand, die genauso wie eine rechte Gegenstände festhalten kann. Allerdings eignet sich das Selex-Verfahren nicht dafür, aus einem Sortiment von Spiegelmeren dasjenige mit der größten Affinität zum Zielmolekül zu finden; denn mit spiegelbildlichen Nucleotiden funktioniert die Polymerasekettenreaktion nicht.

Spiegelmere lassen sich nur über einen Umweg erzeugen. Man spiegelt zunächst das Zielmolekül und sucht aus einer RNA-Bibliothek ein Aptamer, das sich daran bindet. Nachdem dieses vervielfältigt und seine Sequenz ermittelt worden ist, muss man es wiederum spiegeln, damit ein Wirkstoff entsteht, der sich an das Zielmolekül anlagert.

Die Noxxon-Forscher fanden jedoch einen eleganten Ausweg aus dem Dilemma. Sie erzeugen vom Zielmolekül – in der Regel ein Protein – ebenfalls eine spiegelbildliche Version, indem sie statt normaler L-Aminosäuren die spiegelbildlichen D-Formen verwenden. Dafür suchen sie dann mit Hilfe des Selex-Verfahrens das passende Aptamer. »Wenn wir dieses Aptamer spiegeln, haben wir die Bauanleitung für das Spiegelmer, das sich an das eigentliche Zielmolekül heften kann«, erklärt Klussmann.

Doppelter Spiegeltrick

Diese auf den ersten Blick verwirrende Vorgehensweise lässt sich wieder mit einem Beispiel aus der makroskopischen Welt veranschaulichen: Wenn jemand für seine linke Hand (Zielmolekül) einen linken Handschuh (Spiegelmer) benötigt, aber bloß rechte Handschuhe zur Auswahl hat, nimmt er einfach seine rechte Hand (Spiegelbild des Zielmoleküls) und sucht den passenden rechten Handschuh (Aptamer) heraus. Diesen spiegelt er dann und erhält so den linken Handschuh, der automatisch an die linke Hand passt.

Die erstmalige Synthese von Spiegelmeren gelang Klussmann schon in der ersten Hälfte der 1990er Jahre während seiner Doktorarbeit an der Freien Universität Berlin. 1997 war er einer der Mitgründer von Noxxon. »Die Bausteine der Spiegelmere produzieren wir mittlerweile im Kilogramm-Maßstab«, sagt Klussmann. »Sie zu Spiegelmeren zu verknüpfen, ist kinderleicht und geht genauso schnell wie bei normalen Aptameren.« Danach muss an das fertige Molekül nur noch ein Polyethylenglykol gehängt werden, um ein zu schnelles Ausscheiden über die Nieren zu verhindern, was aber kein großer Aufwand ist.

Außer NOX-B11 haben Noxxons Wissenschaftler inzwischen sieben weitere Spiegelmere entwickelt, die bereits in Tierversuchen erprobt wurden. Darunter sind zwei Exemplare, die der Noxxon-Chef in Eigenregie weiterentwickeln möchte und deren klinische Erprobung beim Menschen eventuell schon in diesem Jahr beginnt. Das eine, NOX-E36, zielt auf Lupus nephritis, eine entzündliche Nierenerkrankung. Das andere, NOX-A12, soll gegen die diabetische Retinopathie helfen; diese Augenerkrankung tritt vor allem bei Diabetikern auf, die schon lange zuckerkrank sind. Falls die klinischen Studien erfolgreich verlaufen, hofft Klussmann auf eine Zulassung der beiden Wirkstoffe bis 2012.

Derweil suchen die Wissenschaftler bei Noxxon den Einsatzbereich der Spiegelmere zu erweitern. Bislang beschränkte er sich auf mobile Proteine in der Blutbahn wie Ghrelin. Denn Oligonucleotide können keine Zielmoleküle innerhalb einer Zelle blockieren, weil sie dort nicht hineinkommen. Das könnte sich jedoch bald ändern: »Wir haben molekulare Vehikel entwickelt, so genannte kationische Polymere, mit deren Hilfe wir Spiegelmere in Zellen hineintransportieren«, berichtet Klussmann. Bei Mäusen funktioniere das bereits. Sollte der Ansatz auch beim Menschen erfolgreich sein, hätten Spiegelmere einen weiteren großen Vorteil gegenüber Antikörpern. Die sind laut Klussmann so groß, dass wohl kaum eine Chance besteht, sie in Zellen einzuschleusen.

Thorsten Braun ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Neues über die ersten Galaxien

Mit dem Subaru-Teleskop auf Hawaii haben japanische Astronomen jetzt die bisher fernste Galaxie entdeckt und spektroskopisch untersucht. Sie ist nur 750 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden und ermöglicht damit einen seltenen Blick ins frühe Universum.

Von Georg Wolschin

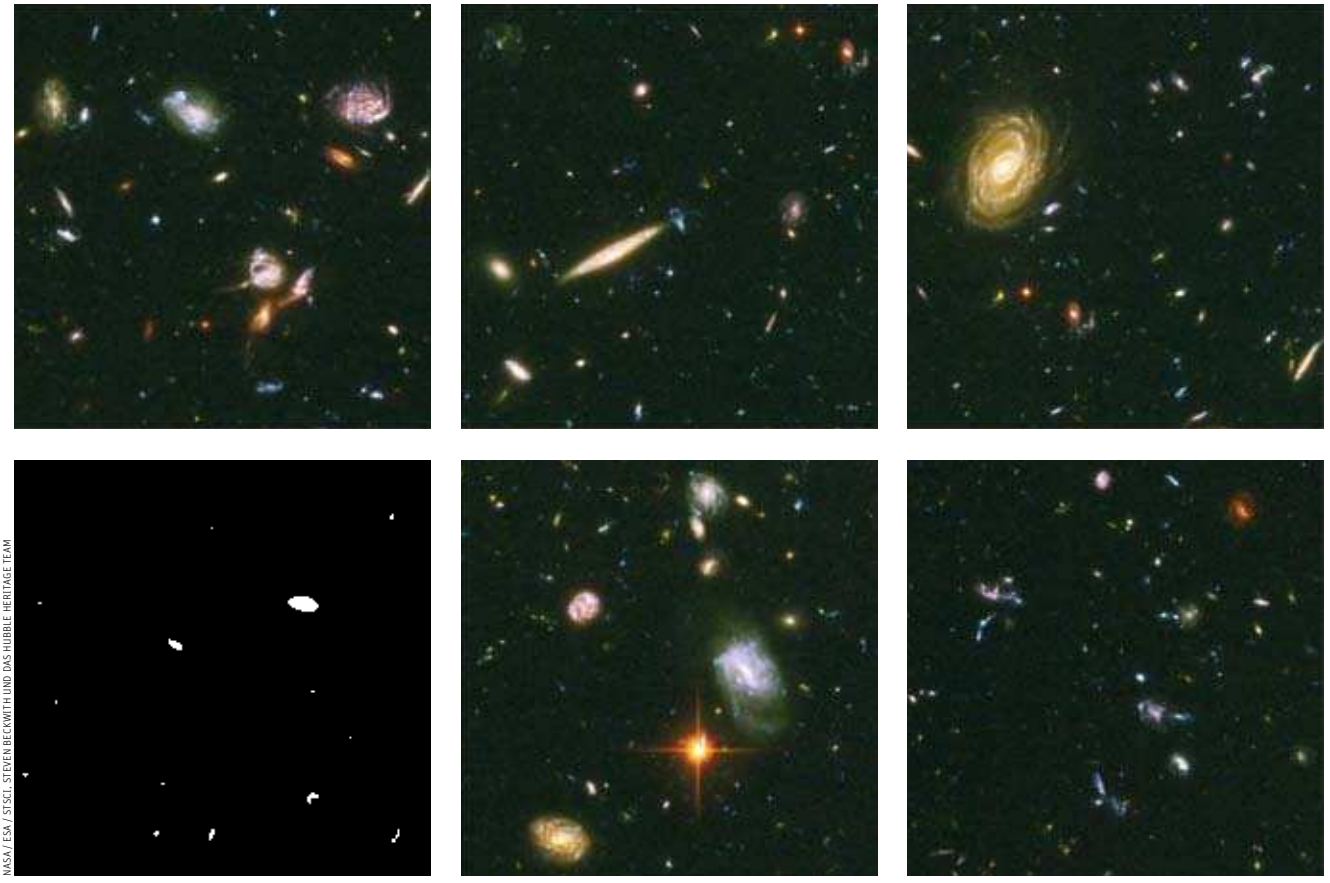
Das beobachtbare Universum entstand, wie die jüngsten Daten des Satelliten WMAP zur kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen, vor 13,7 Milliarden Jahren bei einer gewaltigen Explosion: dem Urknall. Seitdem expandiert der Kosmos und kühlt sich ab. Heute hat die Hintergrundstrahlung, die sich als eine Art Nachglühen des Urknalls auffassen lässt, nur noch eine Temperatur von 2,7 Kelvin.

Die über drei Jahre gesammelten WMAP-Daten geben auch indirekt Aufschluss über die ersten Sterne; denn deren Ultraviolett-Licht hat den Strahlungshintergrund polarisiert – was sich sehr genau messen lässt. Demnach flammten etwa 300 Millionen Jahre nach dem Urknall die ersten Sonnen auf.

Dagegen gibt es kaum Informationen darüber, wann sich die ersten Galaxien bildeten (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2007, S. 46). Was an Licht von ihnen zu uns dringt, ist extrem schwach. Deshalb lässt es sich nur mit hochempfindlichen Instrumenten auf Weltraumsatelliten oder großen Teleskopen am Erdboden registrieren. Das macht den direkten Nachweis der ersten Sternsysteme äußerst schwierig.

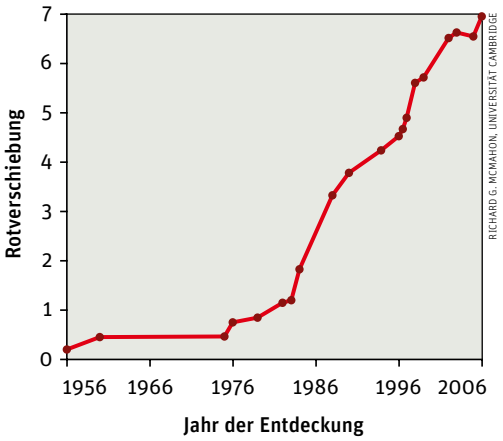
Die Expansion des Alls bedingt, dass wir Objekte aus der Frühzeit des Universums heute in sehr großer Entfernung sehen. Das von ihnen ausgesandte Licht wurde auf dem langen Weg zur Erde durch das sich ausdehnende Universum gestreckt, sodass sich seine Wellenlänge wie bei der Hintergrundstrahlung in den roten bis infraroten Bereich des Spektrums verschoben hat. An dieser Verschiebung können Astronomen erkennen, in welcher Entfernung sich ein kosmisches Objekt befindet und wie alt es folglich ist.

Vor zwanzig Jahren hatten die entlegensten bekannten Galaxien eine Rot- ▷



Diese Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops zeigen weit entfernte Galaxien mit mutmaßlichen Rotverschiebungen jenseits von 7.

NASA / ESA / STSCI, STEVEN BECKWITH UND DAS HUBBLE HERITAGE TEAM



Die Rotverschiebungen der ältesten bekannten Galaxien sind in den vergangenen zwei Jahrzehnten stark gestiegen.

▷ verschiebung – sie ist gleich dem Streckungsfaktor der Wellenlänge minus 1 – von weniger als 2, zehn Jahre danach waren die Astronomen bei 4,55 angelangt, und 2002 lag der Rekord bei 6,56 (Bild oben). In der Folge nutzten Astronomen die Gravitationswirkung von Galaxienhaufen, die als eine Art Linse wirken und das Licht von Objekten dahinter bis zu hundertfach verstärken. Dadurch konnten sie noch wesentlich schwächer leuchtende Quellen erkennen. Im Jahr 2004 gab es Berichte, wonach mit dieser Methode zwei Galaxien mit Rotverschiebungen von 7 und 11 entdeckt worden seien (Spektrum der Wissenschaft 6/2004, S. 20). Der zweistellige Wert entspräche einem Alter von nur 460 Millionen Jahren.

Allerdings beruhte die gemessene Rotverschiebung auf einer relativ schwachen und nicht sehr scharfen Emissionslinie mit unsicherer Zuordnung und war deshalb spektroskopisch keineswegs gut abgesichert. Außerdem konnten andere Astronomen mit ihren Computerprogrammen das ältere Objekt bei der Analyse der Originaldaten nicht finden. Erst kürzlich schlug außerdem ein Versuch fehl, die betreffende Galaxie mit dem Spitzer-Weltraumteleskop zu beobachten.

Das zeigt, wie wichtig es ist, zu fundierten, spektroskopisch einwandfrei belegten Ergebnissen über die ersten Galaxien zu kommen. Dabei geht es inzwischen nicht mehr primär darum, den jeweiligen Rotverschiebungsrekord zu brechen. Vielmehr möchten die Astronomen erfahren, ob sich die beobachteten Eigenschaften der Galaxien im frühen Universum qualitativ ändern. Besonders interessant sind Informationen darüber, wie die Häufigkeit der Sternsysteme mit ihrem Alter variiert. Das erlaubt wichtige Rückschlüsse auf die Entstehungsgeschichte der Galaxien.

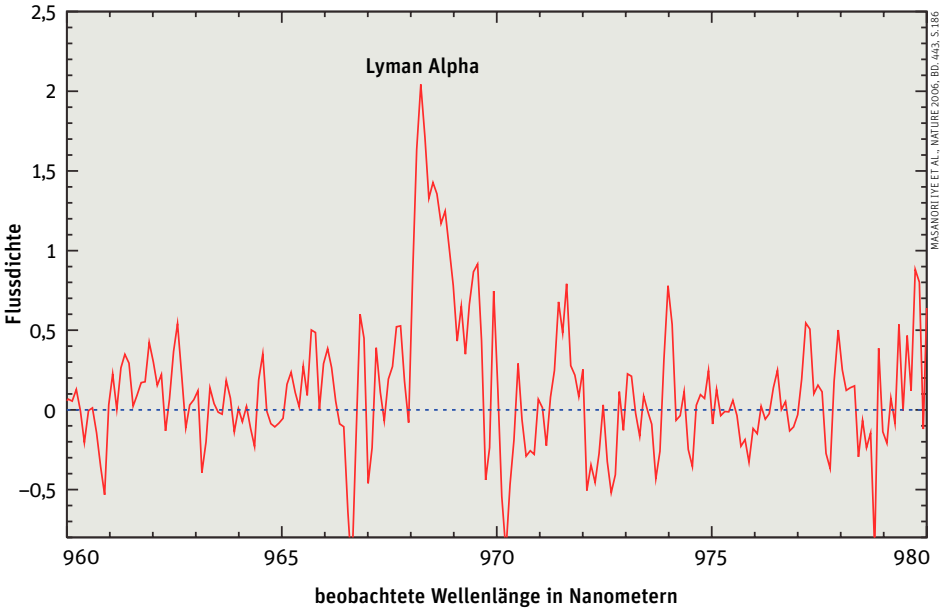
Ende letzten Jahres hat nun ein Team von zehn japanischen Astronomen um Masanori Iye einen zweifelsfreien spektroskopischen Nachweis einer Galaxie namens IOK-1 bei einer Rotverschiebung von 6,96 vorgelegt *(Nature, Bd. 443, S. 186)*. Das Licht dieses Objekts wurde nur 750 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesandt. Damit handelt es sich um die bisher älteste sicher nachgewiesene Galaxie.

Die japanischen Forscher benutzten das 8,2-Meter-Subaru-Teleskop auf dem Gipfel des Mauna Kea auf Hawaii. Zur Aufnahme diente eine Infrarotkamera mit 84 Millionen Bildpunkten. Im Laufe der Durchmusterung eines quadratischen Feldes mit einer Seitenlänge von 14,6 Grad in dem betreffenden Entfernungsbereich wurden 41 533 Quellen fotometrisch nachgewiesen. Alle bis auf zwei waren jedoch auch bei kürzeren Wellenlängen beobachtbar. Deshalb schieden sie als Kandidaten für hohe Rotverschiebungen im Bereich von 7 aus. Von den beiden verbliebenen Objekten fertigten die Astronomen dann mit der Kamera Focas *(faint object camera and spectrograph)* 17 Aufnahmen mit jeweils einer halben Stunde Belichtungszeit an.

Emissionslinie verrät Alter

Zur anschließenden spektrometrischen Analyse diente ein eigens entwickelter schmalbandiger Filter, der auf die so genannte Lyman-Alpha-Emission des neutralen Wasserstoffs zugeschnitten ist. Im Labor liegt diese Linie im ultravioletten Spektralbereich bei 121,6 Nanometern und markiert den Übergang eines Elektrons aus dem ersten angeregten in den Grundzustand. Indem die Gruppe um Iye die elf Spektren mit dem besten Verhältnis von Signal zu Rauschen überlagerte, konnte sie im Spektrum der ersten Quelle IOK-1 die Lyman-Alpha-Linie klar bei 968,2 Nanometern ausmachen (Bild links unten). Das entspricht der schon erwähnten Rotverschiebung von 6,96 oder einem Alter der Galaxie von 12,95 Milliarden Jahren. Die zweite Quelle erwies sich dagegen als zu schwach, um bei den bisherigen Belichtungszeiten eine Spektralanalyse durchzuführen.

In der untersuchten Himmelsregion gibt es folglich mindestens eine und höchstens zwei Galaxien, die schon 750 Millionen Jahre nach dem Urknall existierten. Dagegen wurden im selben Gebiet früher bereits sechs Sternsysteme mit einer Rotverschiebung um 6,6 ent-



Im Spektrum der Galaxie IOK-1 mit einer Rotverschiebung von 6,96 lässt sich bei 968,2 Nanometern zweifelsfrei die Lyman-Alpha-Emissionslinie des Wasserstoffs erkennen. Diesem spektroskopischen Nachweis liegen elf jeweils halbstündige Belichtungen zu Grunde.

deckt. Diese sind demnach 250 Millionen Jahre später entstanden.

Der Vergleich ist nun aufschlussreich: Offenbar nahm die Häufigkeit von Galaxien in der kurzen Zeitspanne zwischen 12,95 und 12,7 Milliarden Jahren vor unserer Zeit auf das Drei- bis Sechsfache zu. Dieser plötzliche Anstieg deutet darauf hin, dass das Universum zu Beginn dieses Zeitraums – also 750 Millionen Jahre nach dem Urknall – noch zu jung war, um eine größere Anzahl von stark leuchtenden Galaxien zu bilden.

Neueste Ergebnisse von Rychard J. Bouwens und Garth D. Illingworth, die an der Universität von Kalifornien in Santa Cruz arbeiten, weisen in dieselbe Richtung. Die beiden Forscher fanden in den Ultra-Deep-Field-Daten des Weltraumteleskops Hubble, die allerdings keine spektroskopischen Messungen beinhalten, nur eine einzige leuchtende Galaxie im Rotverschiebungsbereich von 7 bis 8 *(Nature, Bd. 443, S. 189)*. Wären die Sternsysteme in dieser Entfernung genauso häufig wie bei einer Rotverschiebung von 6, müsste die zehnfache Menge auftreten.

Rekordjagd hält an

Derweil geht die Suche nach sehr alten Galaxien weiter. So hat Richard Ellis vom California Institute of Technology in Pasadena mit dem Gravitationslinseneffekt von Galaxienhaufen im Vordergrund sechs Kandidaten im Rotverschiebungsbereich um 10 gefunden. Das entspräche einem Alter von 13,2 bis 13,3 Milliarden Jahren. Noch ist freilich unklar, wie überzeugend die spektroskopischen Nachweise sind.

Insgesamt scheint sich jedenfalls herauszukristallisieren, dass es nach der Entstehung der ersten Sterne mindestens 400 Millionen Jahre gedauert hat, bis sich auch die ersten hell leuchtenden Galaxien gebildet haben. Im Moment lassen sie sich wegen der Nachweisgrenzen existierender Teleskope nur schwer aufspüren. Mit der nächsten Generation von Weltraum-Observatorien – insbesondere dem James Webb Space Telescope, das 2013 starten soll – dürfte sich das ändern. Dann könnte es gelingen, noch lichtschwächere frühe Galaxien zu entdecken und spektroskopisch einwandfrei zu identifizieren.

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg theoretische Physik.

Springers Einwürfe

Doppelt hält nicht immer besser

Was fängt ein Ohrwurm mit zwei Penissen an?

Mit seinen anderthalb bis drei Zentimetern Länge ist der Sandohrwurm *Labidura riparia* ein stattlicher kleiner Gliederfüßer. In erdig-sandigem Terrain schützt ihn das elegante Sportschuh-Hellbraun seines Chitinpanzers vor der penetranten Aufmerksamkeit räuberischer Vögel und anderer natürlicher Feinde. Nicht verwechseln sollte man ihn mit seinem häufigeren, aber plumperen Verwandten, dem Gemeinen Ohrwurm *Forficula auricularia* – wobei die Gemeinheit durchaus nicht auf Seiten des unschuldigen Insekts liegt, sondern beim Menschen, der dem wendigen Krabbeltier fälschlich unterstellt, es krieche Schlafenden ins Ohr und knabbere dann mit den hinteren Zangen am Trommelfell. (Okay, ich weiß, dass Biologen mit »gemein« nur »gewöhnlich« meinen.)

Viel Aufwand treiben die doch recht sympathischen kleinen Wesen mit ihrem Familienleben, vom auffälligen Balzverhalten der Männchen bis zur gründlichen Brutpflege der Weibchen. Dazu passt, dass dem Sandohrwurmmännchen für die Begattung gleich zwei symmetrisch angeordnete Penisse zur Verfügung stehen. Die daraus resultierende Wahlfreiheit zwischen rechts oder links teilt er mit allerlei Krebsen, Spinnen, Eidechsen und Schlangen. Manche Spinnen empfinden die Wahl übrigens eher als Qual: Sie reißen sich vor dem Akt eines der beiden Fortpflanzungsorgane aus und verspeisen es quasi zur Stärkung vorab *(Nature, Bd. 444, S. 689)*.

Unser Sandohrwurm verhält sich da weit weniger dramatisch: Er benutzt den einen Penis und hält den anderen in Reserve. Wie der Verhaltensforscher Yoshitaka Kamimura von der Universität Hokkaido (Japan) kürzlich im »Journal of Morphology« berichtete, bevorzugen fast neunzig Prozent der Männchen das rechte Exemplar, während das linke zurückgezogen im Unterleib verharrt. Bei Beschädigung oder gar Totalverlust des exponierten Begattungswerkzeugs kann dann jederzeit auf das geschützt bereitliegende Ersatzorgan zurückgegriffen werden.

So weit, so gut, nur: Wenn die doppelte Ausstattung so vorteilhaft ist, warum verfügt dann des Sandohrwurms naher Verwandter, der erwähnte Gemeine Ohrwurm, nur über einen Penis rechts und nicht auch über das linke Gegenstück – ganz zu schweigen von uns Menschen mit einem einzigen zentral angeordneten Glied?

Kamimura gibt zur Antwort, auf dem Evolutionsweg vom biologisch älteren Sandohrwurm zum jüngeren Verwandten sei der linke Penis quasi evolutionär eingespart worden, weil er ohnedies nur selten ins Spiel kommen musste. Eine angeborene Verhaltenspräferenz führte zu einer morphologischen Vereinfachung. Das zieht freilich sofort die Anschlussfrage nach sich, warum der Sandohrwurm just seinen rechten Penis so bevorzugt einsetzt.

An dieser spannenden Stelle muss Kamimura passen. Als Erklärung böte sich eine geringfügige Asymmetrie der weiblichen Anatomie an, die Kopulieren von schräg rechts nahelegt. Dann müssten allerdings Begattungsversuche mit dem rechten Penis merklich erfolgreicher sein als solche mit links. Doch das, so gesteht Kamimiura freimütig ein, ist keineswegs der Fall.

So hütet der Sandohrwurm bis auf Weiteres das Geheimnis, warum er die Symmetrie seines Sexualverhaltens so eklatant bricht und ganz ohne ersichtlichen Grund der Verkehrsregel »rechts vor links« folgt. Vielleicht wird die weitere Erforschung des Rätsels auch zur Klärung der Frage beitragen, warum bei uns Menschen die meisten Organe doppelt vorhanden sind, während sich die egoistischen Gene ausgerechnet zur Weitergabe ihrer selbst mit einem einzigen Werkzeug zufrieden geben.

Michael Springer

Wasser auf dem frühen Mars

Seit ihrer Landung im Januar 2004 erkunden die Nasa-Roboter Spirit und Opportunity die Marsoberfläche, mehrere Raumsonden nehmen sie aus der Umlaufbahn ins Visier. Ihr erstaunlicher Befund: Lange Zeit hat Wasser große Teile der Oberfläche des heutigen Wüstenplaneten bedeckt.

RON MILLER

Von Jim Bell

Februar 2005. Seit mehr als einem Jahr befindet sich der Mars Exploration Rover Spirit in Gusev, einem 165 Kilometer großen Krater am Ende eines alten, ausgetrockneten Flussbetts. Viele von den wie ich am Projekt beteiligten Wissenschaftlern hatten erwartet, Spirit würde bald Spuren von Wasser entdecken, das einst den Krater füllte. Doch an dessen Boden, wo der Rover gelandet war, konnte man davon nichts erkennen. Die von Spirit aufgenommenen Bilder zeigten nur Staub, Sand und trockenes Lavagestein vulkanischen Ursprungs.

Genau wie sein Zwilling Opportunity ist Spirit auf sechs Rädern unterwegs, um die Oberfläche mit Panoramakamera und Infrarotspektrometer zu inspizieren. In seinem Instrumentenarm befinden sich Vorrichtungen zur Gesteinsanalyse, darunter zwei Spektrometer, die am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz und der Universität Mainz entwickelt wurden.

Als sich Spirit in einer beschaulichen Fahrt innerhalb eines Jahres 4,1 Kilometer von seinem Landeort entfernt hatte, erreichte er die Ausläufer der Columbia Hills, einer Kette von Hügeln, die Nasa-Forscher nach den Astronauten der 2003 verunglückten Raumfähre Columbia benannten. Plötzlich wendete sich das Blatt der Marsforscher. Als sich Spirit abmühte, die westliche Flanke des Husband Hill hinauf zu fahren (benannt nach dem Columbia-Kommandanten Rick Husband), hinterließ er tiefe Spuren im Marsboden. An einer Stelle, die wir später nach der kalifornischen Stadt Paso Robles benannten, war der Untergrund besonders rutschig und die Räder legten weiße Ablagerungen frei, die nichts ähnelten, was wir bisher in Gusev gesehen hatten. Spirit hatte Paso Robles bereits weit hinter sich gelassen, als das Missionsteam diese seltsamen Stellen bemerkte – und sofort auf die Bremsen des Roboters drückte.

Die Ablagerungen erwiesen sich als hydratisierte Sulfate: Salze der Schwefelsäure, deren Moleküle von Wassermolekülen umgeben sind. In diesem Fall waren sie reich an Eisen und Magnesium. Vergleichbare Ablagerungen findet man auf der Erde nur dort, wo ▷

Vor 2,5 bis 4 Milliarden Jahren könnte stehendes und fließendes Wasser zu einer typischen Marslandschaft gehört haben. Hier leuchten Salzablagerungen an der Küste in der Dämmerung purpurrot.

Eine Chronik des Mars

Erkenntnisse der jüngsten Marsmissionen veranlassen Planetenforscher, von einer wasserreichen Vergangenheit in der frühen Geschichte des Mars auszugehen. Die angegebenen Zeiten sind grobe Schätzungen.

Ära der grossen Einschläge
Unmittelbar nach seiner Entstehung schlagen Asteroiden und Kometen auf dem Planeten ein. Einschlagbecken entstehen und intensiver Vulkanismus wird ausgelöst. Immer wieder bedecken Ozeane aus Magma, geschmolzenem Gestein, Teile der Oberfläche.

Episoden erdähnlicher Bedingungen
Als die Einschläge nachlassen, füllt flüssiges Wasser einige der Einschlagbecken. Das Wasser gräbt gewaltige Täler in die Marsoberfläche und reagiert mit dem Felsgestein. Es bilden sich Tone und andere hydratisierte Silikate.

▷ Salzwasser verdampft ist oder Grundwasser mit vulkanischen Gasen oder Flüssigkeiten reagierte. Beide Prozesse könnten auch auf dem Mars stattgefunden haben. Zwar haben Forscher weder im Krater Gusev noch irgendwo sonst auf dem Mars aktive Vulkane gefunden, doch mit Sicherheit gab es in seiner frühen Geschichte vulkanische Eruptionen. Die Sulfate könnten Reste einer wasserreichen Umwelt in der Vergangenheit von Gusev sein.

Der Zufallsfund von Spirit passte gut zu den Entdeckungen von Opportunity, seinem Zwillingsroboter, der auf der anderen Seite des Mars unterwegs ist. Bilder und Messdaten, die Raumsonden aus seiner Umlaufbahn liefern, ergänzen unser Bild.

Jahrzehntelang dachten Forscher, der Planet sei schon immer eine kalte und trockene, unwirtliche Welt gewesen. Spuren von Überflutungen und durch Wasser veränderte Mineralien galten als Hinweise auf seltene Ereignisse in der Frühzeit des Planeten vor knapp 4,6 Milliarden Jahren. Die neuen Bilder und Messdaten zwingen uns dazu, diese Vorstellung zu revidieren. Vermutlich war ein Großteil der Marsoberfläche über lange Zeit von Wasser bedeckt – sicherlich in der ersten Milliarde Jahre seiner Geschichte, vielleicht aber noch lange danach. Perioden erdähnlicher Bedingungen können durchaus häufig gewesen sein und lange angedauert haben. Vielleicht entstand auf dem Mars sogar Leben.

Fluviale Landschaften – durch fließendes Wasser geprägte geologische Formationen – waren bereits auf den Bildern zu erkennen, welche die Raumsonden Mariner und Viking in den 1970er Jahren zur Erde funkten. Dazu gehören gewaltige Kanäle, die katastrophenartige Fluten in die Oberfläche gruben, sowie großräumige Talstrukturen, die an Flusssysteme wie den Amazonas erinnern. Im vergangenen Jahrzehnt lieferten Bilder des Mars Global Surveyor, der den Roten Planeten seit 1997 umkreist, spektakuläre Beispiele für kleine und scheinbar junge Abflussrinnen an den Abhängen von Kratern und Canyons.

Zwar lassen diese Ergebnisse keinen Zweifel daran, dass es früher flüssiges Wasser auf der Marsoberfläche gab – oder zumindest knapp darunter. Wie lange solche Perioden jedoch andauerten, verraten sie nicht. Das Wasser der katastrophalen Fluten könnte bereits nach wenigen Tagen oder Wochen gefroren, im Boden versickert oder verdampft sein.

Dass sich die anfangs gefundenen, fluvialen Strukturen auf dem Mars von irdischen Flusstälern unterscheiden, zeigt sich, wenn man beide mit hoher Auflösung betrachtet. Die Täler auf dem Mars könnten allein durch unterirdisch fließendes Wasser sowie Bodenerosionen entstanden sein, und nicht unbedingt durch strömendes Wasser an der Oberfläche. Wasser, das unter einer Eisschicht in den tieferen Boden sickerte oder aus verborgenen Schneeablagerungen stammte, könnte auch die auf Bildern des Mars Global Surveyors sichtbaren Abflussrinnen verursacht haben. Zwar sprechen solche Strukturen für die Existenz größerer Wasservorkommen in der Geschichte des

In Kürze

- Neue Ergebnisse der Marsrover Spirit und Opportunity sowie von Raumsonden in der Umlaufbahn des Mars zeigen, dass es womöglich lange Zeit **fließende und stehende Gewässer** auf diesem Planeten gab.
- Sollten diese **Perioden erdähnlicher Bedingungen** lang angedauert haben, hätte Leben entstehen und sich entwickeln können.
- Zukünftige Marsmissionen werden diese Vermutung überprüfen können, indem sie **Altersbestimmungen der verschiedenen Landschaften** vornehmen.

Austrocknung und Abkühlung
Von den Marsvulkanen ausgestoßener Schwefel löst sich in den stehenden Gewässern. Diese werden sauer und zerstören Tonminerale auf ihrem Grund. Das Obenflächenwasser beginnt zu gefrieren; sporadische Fluten erzeugen jedoch große Ausflusskanäle.

Trocken und unwirtlich
Die vulkanische Aktivität nimmt ab, Staub bedeckt einen Großteil des Planeten. Unter der Oberfläche könnte weiterhin flüssiges Wasser existieren, das gelegentlich freigesetzt wird und die Abflussrinnen an den Hängen von Canyons und Kratern erzeugt.

BILDER DIESER DOPPELSEITE: MICHAEL CARROLL

Mars, doch sind sie keineswegs Beweise dafür, dass es auf diesem Planeten über längere Zeiträume eine wärmere, feuchtere und erdähnlichere Umwelt mit Seen und Flüssen gab.

Noch bevor Spirit und Opportunity mit der Erkundung der Marsoberfläche begannen, lieferten die Raumsonden aus der Umlaufbahn des Roten Planeten Beweise für lange Perioden mit erdähnlichen Bedingungen. Faszinierend war für uns die Entdeckung von Strukturen, die den Mündungsdeltas von Flüssen ähneln. Das bislang beste und größte Beispiel wurde von Mars Global Surveyor dokumentiert: das Ende eines Talsystems, das in den südöstlich des Canyons Vallis Marineris gelegenen Eberswalde-Krater mündet (siehe Abbildung S. 27). Diese Geländeformation endet in einer zehn Kilometer breiten, abgesenkten, fächerförmigen Landschaft, die kreuz und quer von mäandernden, unterschiedlich stark erodierten Graten durchzogen ist. Viele Geologen erkennen in diesen Strukturen alle charakteristischen Merkmale eines Deltas, das sich an der Mündung eines mit Sedimenten beladenen Flusses in einen flachen See bildete.

Die Struktur des Eberswalde-Fächers verrät uns, dass er seine Form viele Male geändert hat, vermutlich bedingt durch Veränderungen seines Zuflusses. Darin ähnelt er dem Missippi-Delta. Es könnte sich beim Eberswalde-Fächer tatsächlich um ein altes Flussdelta handeln, das später zunächst von Sedimentablagerungen verdeckt und dann in jüngerer Zeit auf Grund der Erosion wieder freigelegt wurde. Flüssiges Wasser wäre demzufolge über einen langen Zeitraum über die Oberfläche des Mars geströmt und hätte große Mengen an erodierten Sedimenten befördert. Auch in anderen Regionen auf dem Mars wurden ähnliche Fächer gefunden, obwohl bislang erst fünf Prozent der Oberfläche des Roten Planeten mit einer Auflösung fotografiert wurden, die notwendig ist, um derartige Strukturen zu erkennen.

Fächerförmige Flussdeltas

Vielleicht verraten die aus der Umlaufbahn gemachten Bilder, ob es sich tatsächlich um die Mündungsdeltas von Flüssen handelt. Um zu wissen, wie lange dort Wasser floss, müssen wir jedoch das absolute oder zumindest das relative Alter der verschiedenen Teile der Landschaft kennen. Aus der Umlaufbahn lassen sich absolute Altersbestimmungen nicht ermitteln. Man müsste dafür Gesteinsproben zur Erde holen oder zukünftige Rover mit Laboren für die Radioisotopen-Datierung ausstatten.

Auch die detailreichen Aufnahmen, welche die Sonden Mars Odyssey und Mars Global Surveyor von kleinräumigen Talsystemen auf den Plateaus und an den Hängen des großen Canyons Vallis Marineris machten, sprechen für ein erdähnliches Klima in der Vergangenheit des Mars. Entstanden viele der bis dahin untersuchten Talsysteme durch unterirdisch fließendes Wasser, so weisen die neu entdeckten Täler charakteristische Anzeichen für eine Entstehung durch Regenfälle, Schneeschmelzen oder an der Oberfläche abfließendes Wasser auf. Diese Täler sind vielfach verzweigt, wobei ihre Länge und Breite zu den Mündungen hin zunimmt. Die Quellen liegen nahe der Gebirgskämme, was darauf hindeutet, dass Niederschläge und abfließendes Wasser solche Landschaften prägten – es sind bislang die besten Belege dafür, dass es einst auf dem Mars geregnet hat.

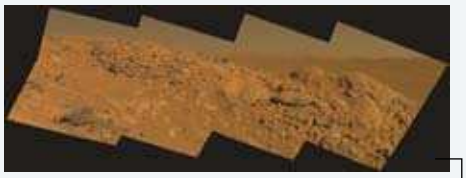
Ob diese von fließendem Wasser geformten Strukturen in einer jüngeren Epoche des Mars entstanden sind, vielleicht sogar eine bis anderthalb Milliarden Jahre nach der Entstehung des Planeten, wissen wir nicht.

Um das relative Alter von Landschaften auf dem Mars zu schätzen, zählen Forscher die Krater in dieser Region: Je mehr es sind, desto älter muss das Gebiet sein. Doch diese Methode ist recht unsicher. So ist es schwierig, zwischen primären und sekundären Einschlagkratern zu entscheiden. Letztere entstehen beim Herabfallen des beim primären Einschlag aus der Planetenkruste geschleuderten Materials auf die Oberflä- ▷

Roboter auf der Jagd nach Wasser

Seit Januar 2004 sind die Mars Exploration Rover Spirit und Opportunity auf der Oberfläche des Roten Planeten unterwegs. Sie haben einige der bislang überzeugendsten Beweise für dauerhafte warme, feuchte Episoden in der Vergangenheit des Planeten geliefert.

Blick vom Landeplatz
Spirit fand an seinem Landeplatz zunächst nichts als Staub, Sand und Vulkangestein. (Im Hintergrund sind die Columbia Hills erkennbar.)



Ein Fels namens Longhorn
Nach sieben Monaten erreichte der Rover eine als »Longhorn« bezeichnete Stelle in der Region »West Spur« der Columbia Hills. Dort tritt Felsgestein an die Oberfläche.

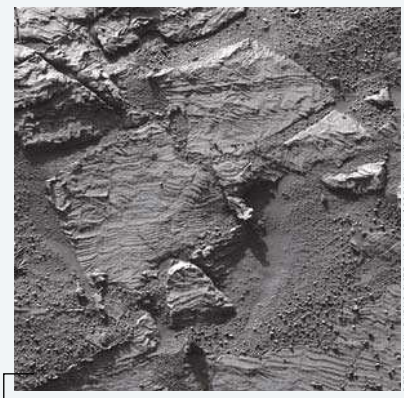
LANDEPLATZ, LONGHORN, PASO ROBLES: NASA, JPL / CORNELL UNIVERSITY

Marsboden am Paso Robles
Am Husband Hill legten die Räder des Rovers weiße Ablagerungen von Sulfatsalzen frei. Vielleicht handelt es sich um Überbleibsel einer wasserreichen Umwelt im Krater Gusev.

Spirit landete im 165 Kilometer durchmessenden Krater Gusev (weisser Punkt). Dieser Krater liegt am Ende eines alten, ausgetrockneten Flusslaufs. Zunächst fand der Rover keinerlei Hinweise auf frühere Wasservorkommen. Als er die flache Ebene, in der er niedergegangen war, verließ und die 4,1 Kilometer östlich des Landeplatzes liegenden Columbia Hills erreichte, stieß er auf andersartige Formationen.

Berry Bowl
In Felsaufschlüssen des Kraters Eagle fand Opportunity millimetergroße Kügelchen, die Forscher »Blueberries« (Blaubeeren) tauften. Bei ihnen könnte es sich um Ablagerungen aus eisen- oder salzhaltigem Wasser handeln, die beim Verdampfen des Wassers zurückblieben.

Burns Cliff
Im nahegelegenen Krater Endurance untersuchte der Rover das Burns Cliff, an dem ausgedehnte Felsschichten freiliegen. Die Klippe lieferte weitere Belege dafür, dass die Landschaft periodisch von Wasser bedeckt war.



BERRY BOWL, BURNS CLIFF: NASA, JPL / CORNELL UNIVERSITY;
OVERGAARD: NASA, JPL / CALTECH / CORNELL UNIVERSITY

Riffelungen auf Overgaard
Am Rand des Erebus-Kraters stieß der Rover auf einen Felsbrocken, den die Forscher Overgaard nennen. Der Felsbrocken zeigt Riffelungen, die vermutlich entstanden, als Wellen über sandige Sedimente hinwegspülten.

Opportunity landete im Krater Eagle in der Region Meridiani Planum (weisser Punkt). Der Rover erreichte dann geschichtetes Sedimentgestein, das darauf hindeutet, dass es hier für lange Zeiträume Wasserflächen gegeben haben muss. Danach ist der Rover nach Süden gefahren und hat mit der Erforschung des 800 Meter großen Kraters Victoria begonnen.

OBERFLÄCHENKARTEN: RON MILLER;
MARS MIT LANDEMARKIERUNG: NASA / STSCI / JIM BELL

che. Verwechslungsgefahr besteht auch zwischen Einschlagkratern und vulkanischen Calderen, und in einigen Regionen hat die Erosion alle Hinweise auf ältere Krater verwischt.

Erweisen sich die durch Wasser geprägten Landschaften auf dem Mars als relativ jung, spräche dies dafür, dass dort für rund ein Drittel seiner Geschichte erdähnliche Bedingungen vorherrschten. Sollten wir auf noch jüngere Täler stoßen, wäre diese Zeitspanne sogar noch länger gewesen.

Umfangreiche Erosions- und Sedimentationsprozesse, die in vielen Regionen des Roten Planeten dokumentiert wurden, passen gut in dieses Bild. Auf der Grundlage neuer Aufnahmen lässt sich ausrechnen, dass die Rate, mit der sich in den ersten Milliarden Jahren Sedimente ablagerten und wieder erodierten, etwa eine Million Mal so hoch war wie heute. Dieser Vergleich ist durch Messungen der Winderosion an den Landeplätzen von Spirit, Opportunity und Mars Pathfinder möglich. Aus der Gestalt der an vielen Stellen extrem ausgehöhlten und pockennarbigen Region Meridiani – das eine Million Quadratkilometer umfassende Gebiet, in dem der Rover Opportunity unterwegs ist – lässt sich ablesen, dass ein Großteil des Geländes durch Erosion abgetragen und irgendwo anders hintransportiert wurde. Die Frage, wohin diese erodierten Sedimente gelangt sind, ist eines der großen Rätsel der Marsforschung.

An anderen Orten – etwa am Grund einiger Krater, an den Böden und Wänden mancher Canyons und Abgründe im Talsystem Valles Marineris – haben Zyklen von Ablagerung und Erosion offenbar gewaltige Stapel Hunderter von Felsschichten hinterlassen, jede zwischen zehn und hundert Meter dick. Ein besonders erstaunliches Beispiel befindet sich im 170 Kilometer großen Krater Gale, dessen Zentralerhebung aus geschichtetem, erodiertem Sedimentgestein besteht. Die Schichten, Kanäle und teilweise verschütteten Einschlagkrater in der Erhebung deuten auf eine lange und komplexe Erosions- und Ablagerungsgeschichte hin.

Rätselhafter Sedimenttransport

Besonders verblüffend ist jedoch, dass die Erhebung den Kraterrand um nahezu einen Kilometer überragt. Demzufolge waren der Krater und seine Umgebung einst vollständig unter Sedimenten begraben, wurden dann teilweise davon befreit und anschließend erneut bedeckt.

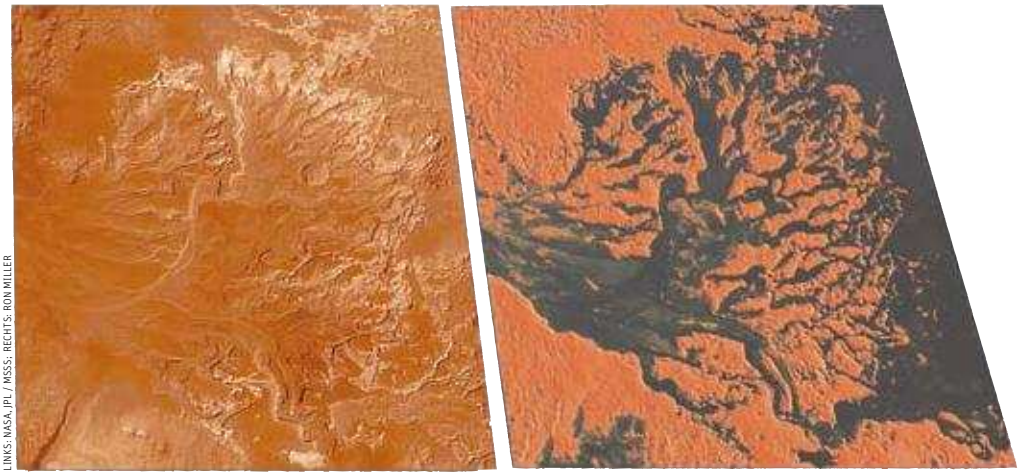
Dieser Vorgang wiederholte sich über einen langen Zeitraum hinweg viele Male. Seitdem die Landschaft das bislang letzte Mal begraben wurde, sind die Sedimente erodiert und an einigen Stellen abgetragen. Ein Teil des Kraterbodens ist wieder erkennbar, aber die zentrale Erhebung wird offenbar langsamer abgetragen und reicht noch immer über den Kraterrand.

Wodurch wurden die Unmengen an Sedimenten transportiert, die nötig sind, um nahezu die gesamte Region des Kraters Gale unter sich zu begraben? Am ehesten kommt wohl fließendes Wasser in Frage. Zwar könnten auch Winde einen Teil der Sedimente bewegt haben – das geschieht bis heute. Dass diese jedoch Millionen von Kubikmetern Material über weite Gebiete der Planetenoberfläche verteilten, ist wenig plausibel. Auf der Erde hat fließendes Wasser immer wieder riesige Mengen an Sedimenten bewegt. Warum sollte es dies nicht auch auf dem Mars getan haben?

Neben den Landschaftsformen verrät uns auch die Zusammensetzung von Mineralien, dass dort früher flüssiges Wasser existierte. Viele Regionen der Marsoberfläche, die nicht von herbeigewehtem Staub bedeckt sind, scheinen aus weit gehend unverwittertem Material zu bestehen, wie etwa den vulkanischen Mineralien Olivin und Pyroxen. Wäre auf der Oberfläche über lange Zeit Wasser geflossen, hätte es diese vulkanischen Mineralien chemisch verändert. Tonminerale und andere oxidierte, hydratisierte Phasen wären entstanden, bei denen Wassermoleküle oder Hydroxid-Ionen in die Kristallstruktur eingebaut sind. Dafür gab es jedoch zunächst keinen Hinweis.

Inzwischen wissen wir, dass die Forscher nicht genau genug hingesehen hatten. Sowohl hochauflösende Daten aus der Umlaufbahn als auch die Messungen der Rover am Boden verraten, dass Tone und andere hydratisierte Minerale auf dem Mars in vielen Regionen häufig vorkommen. So hat das Infrarotspektrometer Omega an Bord der europäischen Raumsonde Mars Express in den staubfreien Teilen der vermutlich ältesten Terrains der Marsgeschichte Tonminerale entdeckt. Die große Zahl von Einschlagkratern in diesen Gebieten deutet auf ein Alter von mehr als 3,5 Milliarden Jahren hin. Tonablagerungen finden sich über den gesamten Planeten verstreut, sowohl in alten vulkanischen Regionen als auch in den kraterreichen Hochlandgebieten, von denen einige offenbar erst in jüngerer Zeit der Erosion ausgesetzt waren.

Bei den neu entdeckten Tonen handelt es sich um Phyllosilikate, die aus Schichten tetraederförmiger SiO_4-Molekülen bestehen, zwischen die Wassermoleküle und Hydroxid-Ionen eingelagert sind. Die chemische Zusammen-



LINKS: NASA, JPL / MSSS; RECHTS: RON MILLER

Diese Aufnahme des Mars Global Surveyor zeigt ein fächerförmiges Netzwerk von Tälern, die zum Krater Eberswalde führen (links). Die mäandernden, sich überlappenden Kanäle in dieser zehn Kilometer breiten Landschaft erinnern unweigerlich an das Delta eines Flusses, der in einen flachen See in dem Krater einmündet. Die künstlerische Darstellung (rechts) zeigt, wie das Flussdelta vor Milliarden von Jahren ausgesehen haben könnte.

Wassererosion bis in die Gegenwart?

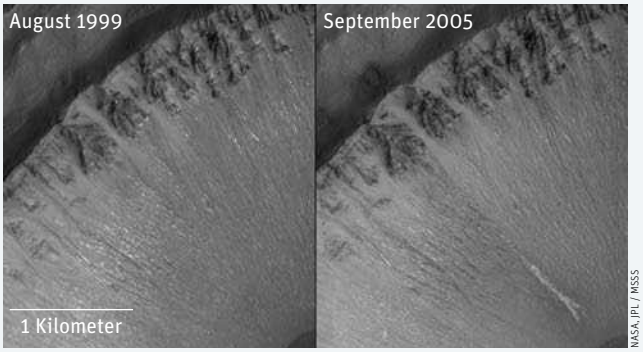
Als Forscher mit der Kamera der Nasa-Sonde Mars Global Surveyor auf der Oberfläche des Roten Planeten im Jahr 2000 auffällige Rinnen an Kraterwällen und anderen Abhängen entdeckten, war ihre Begeisterung groß. Schließlich sind auf der Erde ganz ähnliche Strukturen bekannt: Erosionsrinnen aus arktischen und alpinen Regionen. Diese entstehen, wenn eine Mischung von flüssigem Wasser, Geröll und Sand als Schuttstrom talwärts stürzt.

Nach wenigen Monaten hatten die Forscher Zehntausende dieser meist wenige Kilometer langen Strukturen ausgemacht, vor allem in den gemäßigten und höheren Breiten. Zahlreiche der im Englischen »gullies« genannten Rinnen lassen ein junges geologisches Entstehungsalter vermuten. Ein Forscherteam um Michael C. Malin von der Firma Malin Space Systems in San Diego (Kalifornien) hat nun neue Satellitenbilder ausgewertet, die jüngste Veränderungen im Erscheinungsbild der Rinnen dokumentieren.

Viele Jahre lang lieferte die Mars Orbiter Camera (MOC) von Mars Global Surveyor die besten Bilder kleiner Oberflächenstrukturen. Sie konnte Details von bis zu einem Meter Größe auflösen. Erst als im vergangenen Jahr die Nachfolgesonde Mars Reconnaissance Orbiter ihre Arbeit aufnahm, büßte MOC die Favoritenposition ein. Mit den hochauflösenden Bildern der MOC gelang die Entdeckung der Gullies. Anderen Raumsonden waren die kleinen Strukturen entgangen. Dass zumindest manche Gullies höchstens drei Millionen Jahre alt sind und damit geologisch außergewöhnlich jung, ergab die Analyse der Kraterverteilung in ihrer Umgebung.

Entstanden die geheimnisvollen Marsrinnen durch die Mitwirkung von flüssigem Wasser? Dauert diese Entstehung sogar immer noch an? Die von Malin und seinen Kollegen aufgenommenen Bilder untermauern diese Vermutungen. Das Team verfolgte dabei eine einfache Strategie. Mit der Raumsonde Mars Global Surveyor, zu der erst im November 2006, fast zehn Jahre nach dem Start, der Kontakt abriss, nahmen sie Hunderte solcher Orte immer wieder auf, in der Hoffnung, so Veränderungen festzustellen. In zwei Fällen wurden sie fündig: Die Rinnen hatten sich seit dem letzten Fototermin deutlich verändert.

Dazu gehört ein Krater in der Marsregion Terra Sirenum auf etwa 36 Grad südlicher Breite. Eine Aufnahme von Dezember 2001 zeigte eine Hangrinne, die den Forschern durch ihre besonders hellen Ablagerungen auffiel. Im April 2005 studierte Kenneth Edgett aus Malins Team neue Bilder desselben Kraters. Die zuvor bekannte helle Hangrinne war zwar unverändert, doch direkt daneben fiel ihm ein anderer Gully auf, der nun ebenso hell erschien. Auf den älteren Bildern war die entsprechende Stelle noch dunkel. Durch Kontrollaufnahmen konnten unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse als Ursache der Veränderung ausgeschlossen werden. Einen ähnlichen Fall entdeckten die Wissenschaftler im September 2005, ebenfalls auf der Südhemisphäre des Roten Planeten, in der Nähe des Hellas-Beckens. Auch bei dieser Rinne waren nun helle Ablagerungen auffällig, die auf Fotos derselben Region von 1999 noch nicht zu erkennen sind.



Malin erklärt: »Ablagerungen dieser Form würde man erwarten, wenn flüssiges Wasser das Material den Hang hinuntergespült hätte.« Offenbar weicht der Strom am Kraterhang Hindernissen aus: »Die Gullies haben dort fingerartige Verzweigungen, wo sie am Hangende auf den Kraterboden treffen.« Zwar ist es auf der Marsoberfläche für die dauerhafte Existenz flüssigen Wassers heute zu kalt, und auch die Marsatmosphäre ist außerhalb von Tiefebenen zu dünn. Trotzdem würden die Temperatur- und Druckverhältnisse an günstig gelegenen Orten kurzzeitig die Existenz flüssigen Wassers zulassen (siehe SdW 1/2004, S. 12). Für die Entstehung der Gullies sind nur geringe Mengen Wasser notwendig.

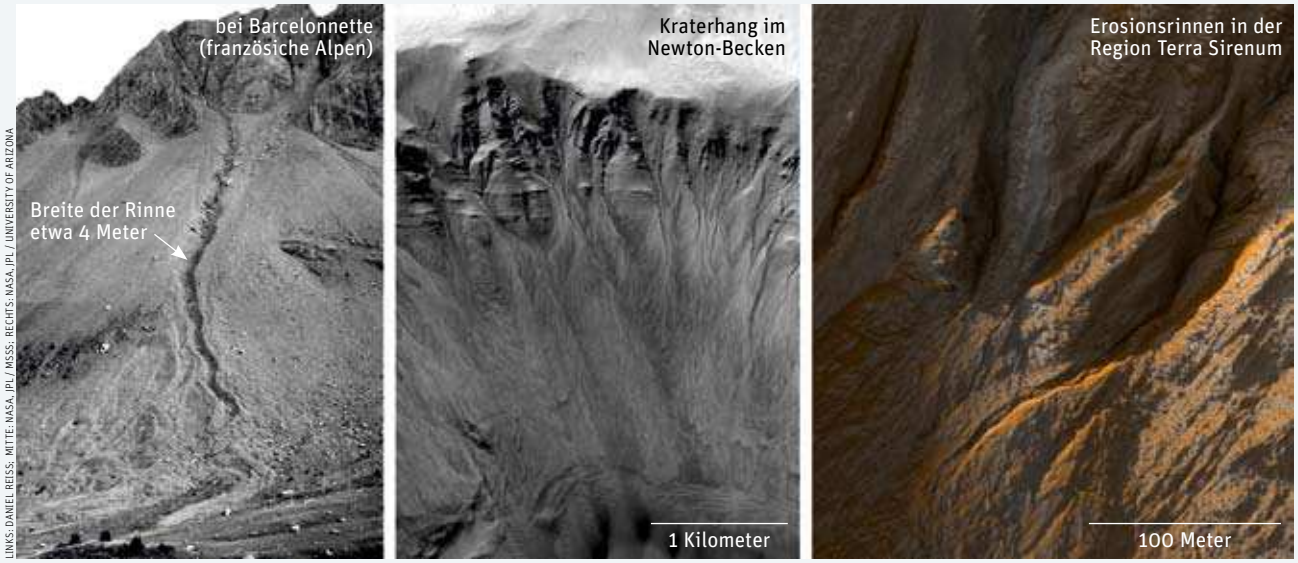
Dennis Reiss, ein Geomorphologe vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hält die Indizien der US-Forscher für schlüssig, fügt jedoch hinzu: »Ein wirklicher Beweis für die Anwesenheit von flüssigem Wasser bei der Entstehung der Gullies ist aber spektroskopischen Messungen vorbehalten.« Nur mit äußerst viel Glück kann eine solche Beobachtung gelingen, denn die Bildung der Gullies vollzieht sich schrittweise und jedes Ereignis dauere höchstens wenige Stunden, vielleicht auch nur einige Minuten, vermutet Reiss.

Eine andere Erklärung der frischen Rinnenablagerungen ist die Annahme, trockener Staub sei den Hang heruntergerieselt und hätte dabei helleres Bodenmaterial frei gelegt. Dieser Prozess kann ebenfalls Fließstrukturen hervorbringen und ist in sehr staubigen Regionen des Mars dokumentiert worden. In Gegenden, die Gullies

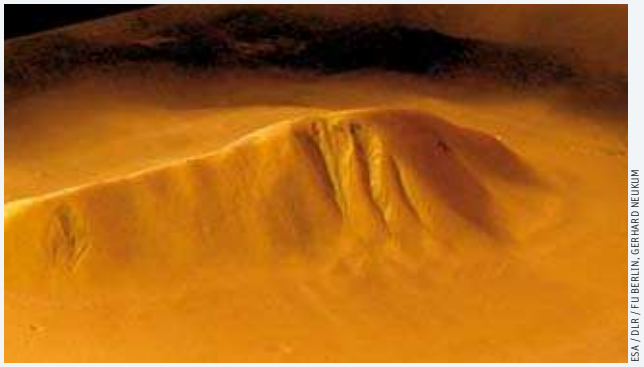
▷ setzung der Tone lässt vermuten, dass sie von unter Wasserbeteiligung verwittertem Vulkangestein herrühren. Obwohl mit Omega bislang erst ein kleiner Teil der Planetenoberfläche mit hoher Auflösung untersucht wurde, deuten diese Minerale darauf hin, dass auf dem frühen Mars lange Zeit erdähnliche Bedingungen herrschten.

Man muss aber nicht unbedingt zu unserem Nachbarplaneten reisen, um Spuren seines früheren Wasserreichtums zu finden. Sogar in einigen Marsmeteoriten haben Forscher Minerale entdeckt, die durch den Einfluss von Wasser verändert wurden: Tone, hydratisierte Eisenoxide und Karbonate. Bei solchen Meteoriten handelt es sich um Gesteinsbrocken, die durch den Einschlag eines Asteroiden oder Kometen auf dem Roten Planeten herausgeschleudert und nach einer langen Reise durch das innere Sonnensystem schließlich auf der Erde niedergegangen sind. Ein Beispiel ist der Meteorit ALH 840001, der 1984 in der Antarktis entdeckt wurde und durch den Verdacht, er enthalte Hinweise auf frühe Lebensspuren, berühmt wurde.

Die durch Wasser verursachte Verwitterung könnte bei diesem Gestein unterirdisch stattgefunden haben, denn die meisten der Marsmeteoriten stammen aus der oberen Kruste des Planeten,



LINKS: DANIEL REISS; MITTE: NASA, JPL / MSSS; RECHTS: NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA



ESA / DLR / FU BERLIN, GERHARD NEUKUM

Mit der Mars Orbiter Camera (MOC) an Bord des Mars Global Surveyor gelang der Nachweis, dass sich eine Rinne (»gully«) am Rand eines Einschlagkraters in der Region Centauri Montes innerhalb weniger Jahre veränderte. Im September 2005 waren darin helle Ablagerungen zu sehen, die es im August 1999 noch nicht gab (linke Seite oben). Die mit der MOC und der Kamera HiRISE an Bord des Mars Reconnaissance Orbiter dokumentierten Rinnen an Kraterrändern ähneln Erosionserscheinungen auf der Erde (oben). Mit der Kamera HRSC an Bord der europäischen Sonde Mars Express gelang es, an einem 1500 Meter hohen Berg in der Region Tempe Terra vermeintlich ähnliche Rillen zu finden (rechts eine perspektivische Ansicht des Digitalmodells).

aufweisen, seien diese so genannten »slope streaks« jedoch trotz der großen Zahl ausgewerteter Fotos nicht gefunden worden, betonen Malin und seine Kollegen.

Wenn es sich also tatsächlich um Wasser handelt, das den Marsboden hangabwärts fließen lässt: Woher stammt es? Das Team um Malin verdächtigt Grundwasser, das in wasserführenden Bodenschichten, beispielsweise an den Hängen von Kratern, an die Oberfläche tritt. Dort wird es von einer Barriere aus Eis und Gestein zurückgehalten. Bricht solch ein Damm, geht ein Schlammstrom zu Tal. Reiss hält dem entgegen, dass auch kleine isolierte Berge Gullies aufweisen. Wasserführende Schichten seien da als Quelle des nassen Elements aber nur schwer vorstellbar.

Reiss hat eher den Wasserdampf aus der Gashülle des Planeten in Verdacht. Als Frost schlage sich dieser bei niedriger Umgebungstemperatur in oberflächennahen Schichten nieder. Wird der Gefrierpunkt örtlich überschritten, schmelzen die Frostablagerungen. Ein Indiz ließe sich womöglich auf neuesten Aufnahmen des Mars Reconnaissance Orbiters erkennen. Darauf sind Frostablagerungen in Gullies zu sehen. Bislang ist jedoch unklar, ob es sich dabei um Wassereis oder Trockeneis, also gefrorenes Kohlendioxid, handelt.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und freier Wissenschaftsautor in Heidelberg.

nicht jedoch unmittelbar von der Oberfläche – deren Anteil am aufgeworfenen Material ist gering. Da einige dieser Meteoriten offenbar aus relativ jungen Bereichen der Marskruste stammen, vermuten manche Forscher, dass diese unterirdische Verwitterung noch heute geschieht. Derzeit laufende oder zukünftige Marsmissionen könnten diese Hypothese prüfen. Spektakulär wäre es, wenn die Rover aktive Quellen oder hydrothermale Aktivität finden würden. Künftige Roboter oder bemannte Marsmissionen könnten mit Bohrgerät tiefere Schichten studieren.

Acht Monate vor der Entdeckung am Paso Robles, als Spirit seinen mühsamen Aufstieg in die Columbia Hills begann, untersuchte der Rover einen zerklüfteten Felsbrocken. Das Ergebnis: Der Stein enthält Hämatit, ein stark oxidiertes Eisenmineral, das wir auf der Erde häufig in Böden finden, die Wasser chemisch veränderte. Nur wenige Monate später fand Spirit neben Phyllosilikaten auch Spuren von Goethit, einem oxidierten Eisenmineral, in dessen Kristallstruktur Hydroxid-Ionen eingelagert sind, die von Wasser stammen.

Insgesamt sind die Columbia Hills also voller Hinweise auf Wechselwirkungen zwischen Gestein und Wasser. In den jüngeren vulkanischen Ebenen, die ▷

▷ Spirit zuvor untersucht hatte, gibt es nichts Vergleichbares.

Nachdem Spirit den Gipfel des Husband Hill erreicht hatte und mit seiner Fahrt hinab in die südlich gelegene Senke begann, stieß der Rover auf weitere Salzablagerungen unter der Oberfläche, die denen vom Paso Robles ähnelten, aber noch umfangreicher waren. Leider konnten wir diese Ablagerungen bislang nicht weiter erkunden, da der zweite Marswinter der Rovermission bevorstand. Spirit erhält seine Energie aus Solarzellen, und so musste er umgehend einen Standort an einem Nordhang finden, um dort für die Überwinterung genug Sonnenlicht zu empfangen. Wenn alles gut geht, werden wir Spirit nach Anbruch des nächsten Marsfrühlings zu den Salzablagerungen zurückschicken.

Auf der Suche nach verschollenen Karbonaten

Währenddessen hat Opportunity in Meridiani Planum einige erstaunliche Beobachtungen gemacht. Bereits wenige Wochen nach seiner Landung entdeckte der Rover in auffällig geschichteten Sedimentgesteinen Ablagerungen, die porös, hydratisiert und salzig sind und mehrere Dutzend Meter unter die Oberfläche reichen. Messungen von Raumsonden in der Umlaufbahn zeigen, dass solche Formationen vermutlich in der gesamten Region existieren. Wir schließen daraus, dass es hier einst für lange Zeiträume flüssiges Wasser an der Oberfläche gab.

Opportunity und Spirit enthüllen dabei zwei unterschiedliche Epochen der Wassergeschichte des Mars. Die von Opportunity gefundenen hydratisierten Gesteine enthalten überwiegend schwefelhaltige Minerale wie etwa Jarosit. Und auch die Sedimentgesteine der Felsaufschlüsse sind reich an Chlor, Brom und Schwefel. Diese Elemente sind in Wasser gut löslich. Vermutlich blieben diese Ablagerungen zurück, nachdem Salzwasser verdampfte. Womöglich ist dies ein Hinweis auf eine Zeit, in der die Seen und Flüsse der Meridiani Planum schrumpften und schließlich austrockneten.

Dass es auf dem Mars stehende Gewässer gab, lassen auch die »Blaubeeren« vermuten – millimetergroße, hämatithaltige Kügelchen, die Opportunity bereits kurz nach der Landung entdeckte (siehe Bild auf S. 26). Wahrscheinlich sind es so genannte Konkretionen: kleine Gebilde, die durch Ausfällung aus eisen- oder salzhaltigem Wasser entstehen, wenn dieses verdampft. Geschieht das langsam und gleichförmig, bleiben runde Gebilde zurück. Auf der Erde können Konkretionen so groß wie Murmeln oder gar Tischtennisbälle werden. Je weiter der Rover nach Süden kam, desto kleiner wurden die »Blaubeeren«. Demzufolge unterschieden sich Wasserbedeckung und Verdunstungsrate von Ort zu Ort.

Die Messdaten der beiden Rover belegen, dass Schwefel in der Klimageschichte des Mars eine wichtige Rolle spielte. Vermutlich ist dieses Element durch den aktiven Vulkanismus in der Frühzeit des Planeten in die Atmosphäre und an die Oberfläche gelangt. Schwefel und schwefelhaltige Minerale sind wasserlöslich und die sich ergebenden Lösungen können recht sauer sein. Sie bauen zum Beispiel Karbonate ab und verhindern die Entstehung anderer Minerale, wie etwa von Tonen. Dass sich Schwefel auf dem Mars ansammelte, könnte also erklären, warum die Forscher bislang keine Karbonate auf der Oberfläche gefunden haben und Tonminerale nur in den ältesten Regionen erhalten sind. Mit dem Infrarotspektrometer Omega fand man nicht nur in Meridiani Planum, sondern auch anderswo Schwefelablagerungen – alle diese Regionen sind jünger als die tonhaltigen Gebiete. Nirgendwo scheint es sowohl Sulfate als auch Tone zu geben.

Diese Indizien lassen sich plausibel zu einer Umweltgeschichte des jungen Mars zusammenfügen, in der Wasser über lange Zeit existierte und die Oberfläche wesentlich prägte. Demzufolge existierten Pfützen, Tümpel, Seen und Meere unter einer Atmosphäre, die dichter und wärmer war als heute. Zumindest in der ersten Jahrmilliarde seiner Geschichte ähnelte der Rote Planet unserer Erde viel mehr als heute. Möglicherweise entstand dort sogar Leben. Doch veränderte sich die Umwelt auf dem Mars. Der Schwefelgehalt stieg, die Gewässer wurden sauer und die geologische Aktivität des Planeten ließ nach. Als saurer Regen das vulkanische Gestein chemisch veränderte und die zuvor entstandenen Karbonate zersetzte, verschwanden die Tone und wurden durch Sulfate ersetzt. Im Lauf der Zeit wurde die Atmosphäre dünner. Ging sie ins Weltall verloren, als sich das planetarische Magnetfeld abschwächte? Wurde sie durch einen gewaltigen Einschlag fortgeblasen? Oder verschwand sie irgendwie in der Kruste des Planeten? Jedenfalls wurde aus dem Mars allmählich der kalte, trockene Planet, den wir heute kennen.

Als besonders kritisch dürfte sich die Frage erweisen, wo die Karbonate verblieben sind, die in der warmen, feuchten und kohlenstoffreichen Umgebung entstanden sein sollten. Bislang haben wir sie nirgendwo auf dem Mars gefunden, nicht einmal in den ältesten Landschaften, in denen Tonminerale existieren. Saures Wasser könnte zwar die meisten Karbonate zerstört haben, doch sicherlich nicht alle. Natürlich fragen wir uns auch, ob auf dem Mars jemals Leben entstand. Und wenn ja, wie reagierte es auf den Wandel zu einer lebensfeindlichen Umwelt?

Antworten auf diese Fragen hängen entscheidend davon ab, wie lange die erdähnlichen Bedingungen andauerten. Bis wir Bodenproben für eine genaue Altersbestimmung mit radioaktiven Isotopen vom Mars in ein irdisches Labor bringen (oder ein Labor zum Mars verfrachten) können, bleibt uns nichts anderes übrig, als weiterhin mit Raumsonden aus der Umlaufbahn nach wichtigen Mineralen Ausschau zu halten und nach geeigneten Landeplätzen für künftige Rover zu suchen. Eines Tages werden wir dann die Dauer der wasserreichen Vergangenheit des Mars datieren können. ◁

Jim Bell ist Professor für Astronomie und Planetenforschung an der Cornell Universität in Ithaca (New York) und Mitglied der Wissenschaftlerteams der Missionen Mars Pathfinder, Near, Mars Odyssey, Mars Exploration Rover, Mars Reconnaissance Orbiter und Mars Science Laboratory. Er ist der leitende Wissenschaftler für die Panorama-Farbkameras der beiden Rover Spirit und Opportunity.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Global mineralogical and aqueous Mars history derived from Omega/Mars Express data. Von J.-P. Bibring et al. in Science, Bd. 312, S. 400, 2006

Present-day impact cratering rate and contemporary gully activity on Mars. Von Michael C. Malin, Kenneth S. Edgett, Liliya V. Polsiolova et al. in Science, Bd. 314, S. 1573, 2006

Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars. Von Michael C. Malin und Kenneth S. Edgett in Science, Bd. 302, S. 1931, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/861878.

ÄTHIOPISCHES NATIONALMUSEUM, ADDIS ABEBA

Drei Jahre alt wurde dieses *Australopithecus*-Mädchen. Nicht nur sein Skelett, sondern auch der etwa 13 Zentimeter große Kopf ist hervorragend erhalten.

Lucys Baby

Ein 3,3 Millionen Jahre altes Kinderskelett aus Äthiopien erzählt von der Lebensweise zur Frühzeit des aufrechten Gangs und vom schon verzögerten Gehirnwachstum der Vormenschenkinder.

Von Kate Wong

Die Wüstenregion Afar im Nordosten Äthiopiens gehört seit Langem zu den ergiebigsten Fundorten für wertvolle, oft spektakuläre Fossilien früher Hominiden. Insbesondere stammt von dort »Lucy«, ein 3,2 Millionen Jahre altes, vor dreißig Jahren entdecktes Frauenskelett der Vormenschenart *Australopithecus afarensis*.

Im letzten Jahr machten die Fossilien eines kleinen Kindes Schlagzeilen. Nur vier Kilometer vom Fundort Lucys entfernt, im Gebiet Dikika, lagen seine Überreste fest in Gestein verbacken. Allem Anschein nach gehörte dieses Kind zur selben *Australopithecus*-Art wie Lucy, somit zu einer der mutmaßlichen Spezies in der menschlichen Ahnenreihe. Obwohl das Dikika-Kind etwas früher lebte – vor 3,3 Millionen Jahren – und bereits etwa drei Jahre alt war, sprechen Anthropologen salopp von Lucys Baby. Der Fund stellt in vieler Hinsicht eine Sensation dar. So ist dieses Skelett vollständiger als jedes andere von Australopithecinen, sogar als das von Lucy. Außerdem handelt es sich um das früheste bisher aufgetauchte Kinderfossil aus dem Kreis der Vormenschen. Erstmals können Forscher nun untersuchen, ob die Kinder unserer mutmaßlichen Urahnen schon anders wuchsen als junge Menschenaffen.

Begeistert meint Donald C. Johanson von der Arizona-State-Universität, der 1974 Lucys Skelett freilegte: »Nimmt man Lucy als den größten Fos- ▷

▷ silienfund des 20. Jahrhunderts, so ist dieses Kleinkind der bisher größte des 21. Jahrhunderts.«

Es geschah Ende des Jahres 2000 auf einer Feldexpedition unter Leitung des äthiopischen Anthropologen Zeresenay Alemseged: Am Nachmittag des 10. Dezember erspähte ein Teilnehmer plötzlich im Gestein ein kleines Gesicht, oder eigentlich nur einen Ausschnitt davon. Trotzdem, erinnert sich Alemseged, erkannten die Forscher sofort – unter anderem an der flachen Brauenpartie und den kleinen Eckzähnen –, dass sie einen so genannten Homininen vor sich hatten. Der übrige Kopf und ein Großteil des Körperskeletts waren in einem melonengroßen Sandsteinblock verborgen. (Seit einiger Zeit stellen einige Systematiker in die Familie der Hominiden, der Menschenartigen, auch die afrikanischen Menschenaffen. Deswegen fassen sie den Zweig, der Vor- und Frühmenschen hervorbrachte, nun in die Unterfamilie der Homininen.)

Alemseged, der nach seiner Promotion in Paris an der Arizona-State-Universität in Tempe forschte, arbeitet heute am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. Er benötigte Jahre, um einige entscheidende Skelettteile von dem zementharten Sandstein zu befreien und zu präparieren – mit Zahnarztinstrumenten entfernte er praktisch Körnchen für Körnchen. In den nächsten Jahren entdeckten er und sein Team zudem an der Fundstelle noch weitere Fossilien des Skeletts. Diese Arbeiten wie auch die exakte Untersuchung der Knochen sind noch lange nicht abgeschlossen.

Trotzdem liefert der Fund bereits jetzt so wichtige Erkenntnisse zur menschlichen Evolution, dass der Leipziger Forscher und seine Kollegen ihre Daten im September 2006 in der Wissenschaftszeitschrift »Nature« vorstellten. Ein zweiter Artikel in derselben Ausgabe bespricht den geologischen und paläontologischen Fundzusammenhang. Auf der Pressekonferenz in Äthiopien, bei der Alemseged und seine Kollegen ihre Entdeckung bekannt gaben, berichteten die Forscher, sie hätten das Kind »Selam« genannt, was in mehreren Sprachen des kriegsgebeutelten Landes »Friede« bedeutet – als ein Zeichen für die Afar-Region mit ihren verfeindeten Stämmen.

Fossilien von kleinen Kindern sind extrem selten, allein schon wegen ihrer zarten, unausgereiften Knochen. Das bis dahin einzige einigermaßen vollständige vorzeitliche Kinderskelett stammt von einem Neandertaler. Es ist »nur« 50 000 Jahre alt. (Vom »Kind von Taung« aus Südafrika ist nur der Kopf erhalten. Es wird der Vormenschenart *Australopithecus africanus* zugerechnet, die später lebte als *A. afarensis*; siehe Bild S. 39).

Eingebettet im Schlamm einer Überflutung

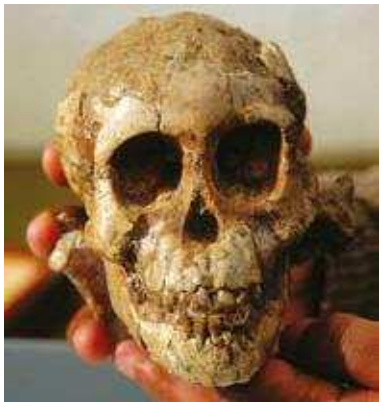
Umso mehr erstaunt der Fund von Dikika. Wie die Forscher aus den Zähnen schließen, handelt es sich um das Skelett eines etwa dreijährigen Mädchens. Vom Kopf ist vor allem die Gesichtspartie wunderbar erhalten. Das meiste vom Hirnschädel fehlt zwar. Jedoch gibt es von ihm einen inneren Abdruck, der einen Eindruck davon vermittelt, wie das Gehirn aussah. Vom übrigen Skelett liegen der Oberkörper, Teile der Beine und Füße – sogar die winzigen Kniescheiben –, auch ein Oberarmfragment und einige Fingerknochen vor (siehe Kasten S. 36). Auch saßen viele dieser

In Kürze

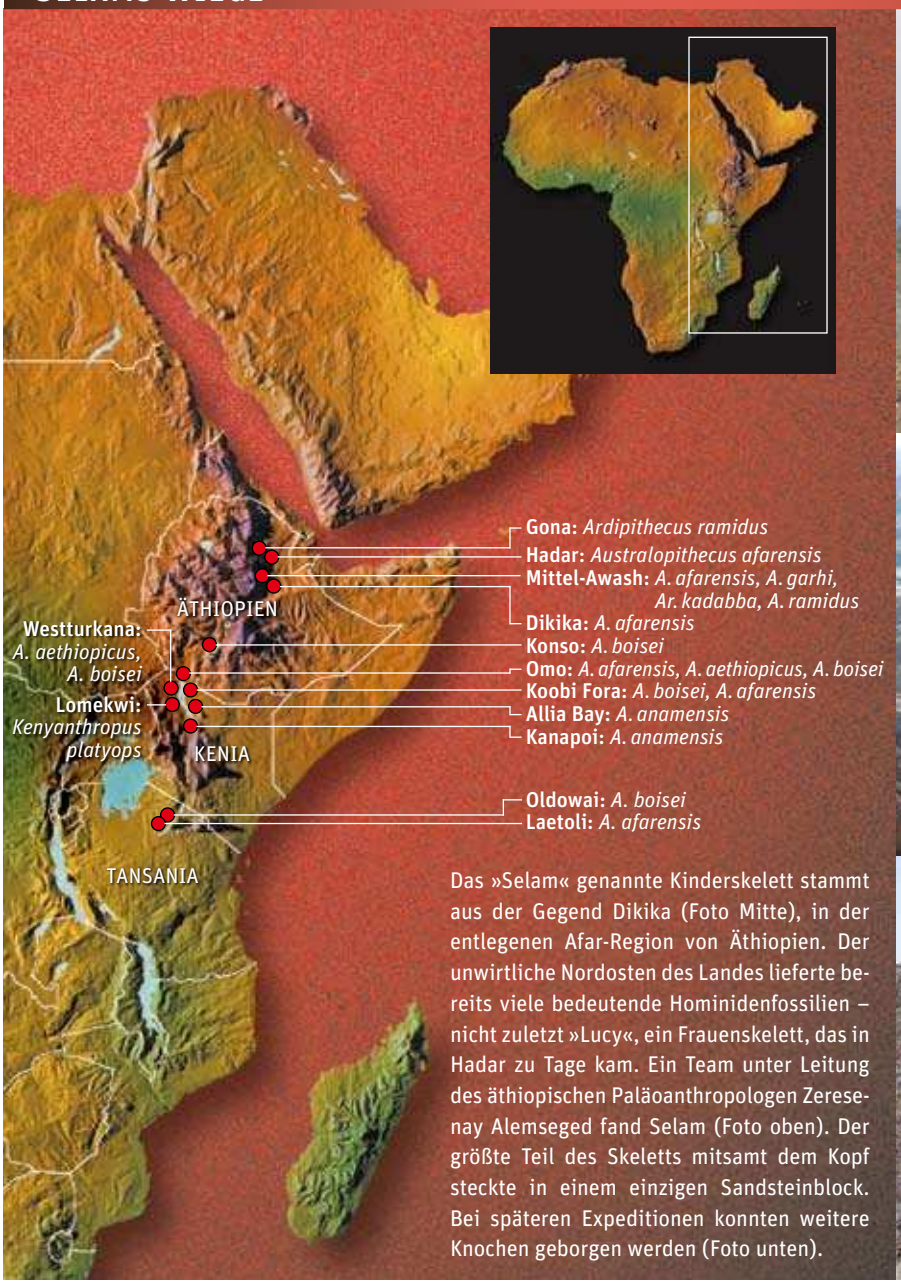
▶ Im Gebiet Dikika im Nordosten Äthiopiens fanden Paläoanthropologen das **fossile Skelett eines Kleinkinds**. Es gehört zu *Australopithecus afarensis*, der Vormenschenart, von der wir vermutlich abstammen. Zur selben Art wird das berühmte »Lucy« genannte Frauenskelett gerechnet.

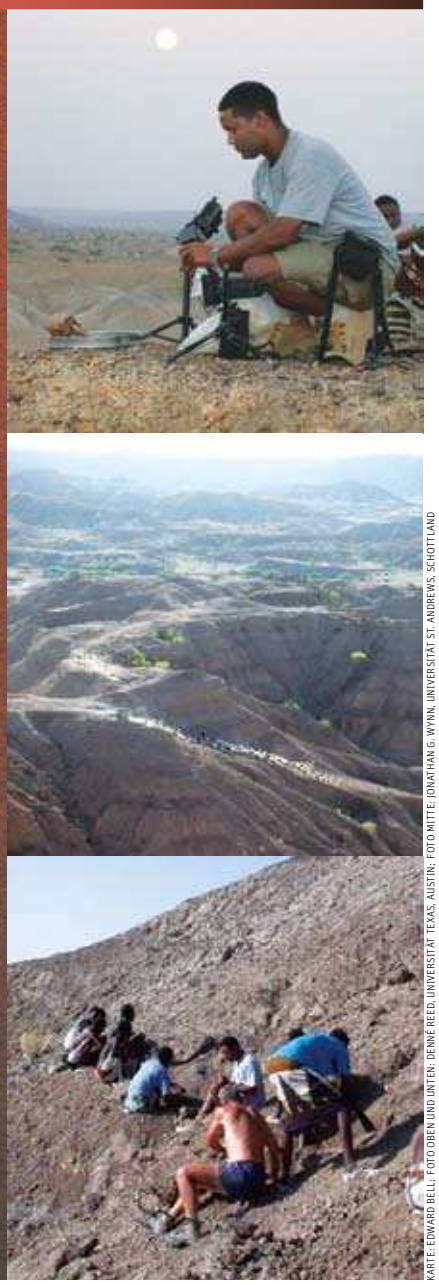
▶ Das Kind, ein dreijähriges Mädchen, lebte vor 3,3 Millionen Jahren. Sein bemerkenswert vollständiges Skelett – das die Forscher »Selam« (Friede) nennen – ist das **älteste kindliche Fossil** in der menschlichen Ahnenreihe.

▶ Der sensationelle Fund umfasst bisher von *A. afarensis* noch nicht bekannte Skelettteile. Das liefert neue Anhaltspunkte über die **Evolution des aufrechten Gangs**, so vor allem über die Reihenfolge, in der sich bei der Menschwerdung die einzelnen Körperpartien veränderten.


REUTERS

Selams Wiege





Das »Selam« genannte Kinderskelett stammt aus der Gegend Dikika (Foto Mitte), in der entlegenen Afar-Region von Äthiopien. Der unwirtliche Nordosten des Landes lieferte bereits viele bedeutende Hominidenfossilien – nicht zuletzt »Lucy«, ein Frauenskelett, das in Hadar zu Tage kam. Ein Team unter Leitung des äthiopischen Paläoanthropologen Zeresenay Alemseged fand Selam (Foto oben). Der größte Teil des Skeletts mitsamt dem Kopf steckte in einem einzigen Sandsteinblock. Bei späteren Expeditionen konnten weitere Knochen geborgen werden (Foto unten).

KARTE: EDWARD BELL; FOTO OBEN UND UNTEN: DENNE REED, UNIVERSITÄT TEXAS, AUSTIN; FOTO MITTE: JONATHAN G. WYNN, UNIVERSITÄT ST. ANDREWS, SCHOTTLAND

Knochen noch in ihrer natürlichen Position zueinander, was bei solchen Fossilien nicht oft vorkommt.

Tierfossilien im Umkreis des Kindes waren ähnlich vorzüglich erhalten. Deswegen glaubt Jonathan G. Wynn von der Universität von Südflorida in Tampa, einer der Geologen des Teams, dass die Kleine bei einer Überflutung unter Schlamm begraben wurde. Sie könnte ertrunken sein, vielleicht war sie aber auch vorher schon tot.

Selam besaß als Dreijährige schon die charakteristischen Merkmale ihrer Spezies. So unterscheiden sie zum Beispiel von dem Taung-Kind deutlich die Kiefer- und Mundpartie und das schmale Nasenbein. Auch der Unterkiefer gleicht in manchen Einzelheiten Fossilien von *A. afarensis* aus Hadar, wo auch Lucy gefunden wurde.

Viele Anthropologen interessiert besonders das Körperskelett des Kindes. Sie erhoffen sich davon Aufschlüsse, wie diese Vormenschen sich vorzugsweise fortbewegten: wie gut sie bereits aufrecht gingen, ob sie noch mühelos kletterten, ob sie viel Zeit in Bäumen zubrachten. In der Hinsicht zeigt Selam genau jene verwirrende Mischung an Anpassungen, über die Forscher bei anderen Exemplaren von *A. afarensis* schon seit Jahrzehnten rätseln. Dass die Vertreter dieser Art recht passabel auf zwei Beinen gehen konnten, gilt zwar längst als sicher. Jedoch streiten die Wissenschaftler seit den 1980er Jahren darüber, ob Lucy und ihre Artgenossen gleichzeitig noch ans Baumleben adaptiert waren.

Denn merkwürdigerweise passt bei dieser Art die untere Körperhälfte gut zum aufrechten Gang, während Oberkörper und Arme altmodischer wirken, so als hätten jene Primaten noch viel und geschickt im Geäst herumgeturnt. Sie besaßen zum Beispiel auffallend lange, gekrümmte Finger, mit denen sie sich an und auf Ästen gut hätten festhalten ▷

Der sensationelle Fund

Schon jetzt gilt »Selam« als eines der vollständigsten vormenschlichen Skelette. Viele der Knochen sind noch nicht einmal freipräpariert. Im Schema unten, vom Skelett eines erwachsenen *A. afarensis*, sind die vermuteten erhaltenen Teile goldbraun markiert.

Beim Gesicht (a) zeigt unter anderem das schmale Nasenbein die Zugehörigkeit zur Art *A. afarensis* und nicht zur etwas späteren Art *A. africanus*.

Vom Schädel hat sich der Innenabdruck erhalten (b). Anscheinend erreichte das Gehirn seine volle Größe schon langsamer als bei jungen Schimpansen.

Nicht nur das Milchgebiss ist konserviert, sondern auch die im Ober- und Unterkiefer bereits angelegten, noch unfertigen bleibenden Zähne. Das computertomografische Bild zeigt sie im Ober- und Unterkiefer (c).

Sogar das Zungenbein im Mundboden ist vorhanden (d). Dieser zarte Knochen hält Zunge und Kehlkopf in Position. Das einzige andere Zungenbein eines früheren Homininen stammt von einem 60 000 Jahre alten Neandertalerskelett. Der Kehlkopf von Selam dürfte noch dem von Schimpansen geähnelt haben.

Den aufrechten Gang von *A. afarensis* erweisen bereits andere Funde. Auch die Beine (e) und Füße von Selam (f: ein Teil von Fuß, Ferse und Schienbein) sprechen hierfür, so die breite Ferse.

Zugleich legt der Bau des Oberkörpers nahe, dass dieser Primat auch noch recht leicht auf Bäumen klettern konnte. Das Mädchen hatte lange, gebogene Finger (g), mit denen es gut Äste hätte umgreifen können. Auch weist die Gelenkpfanne des Schulterblatts ähnlich wie bei Menschenaffen nach oben (h), nicht seitwärts wie beim Menschen. Trotzdem erinnern die Muskelansatzflächen an die menschliche Anatomie.

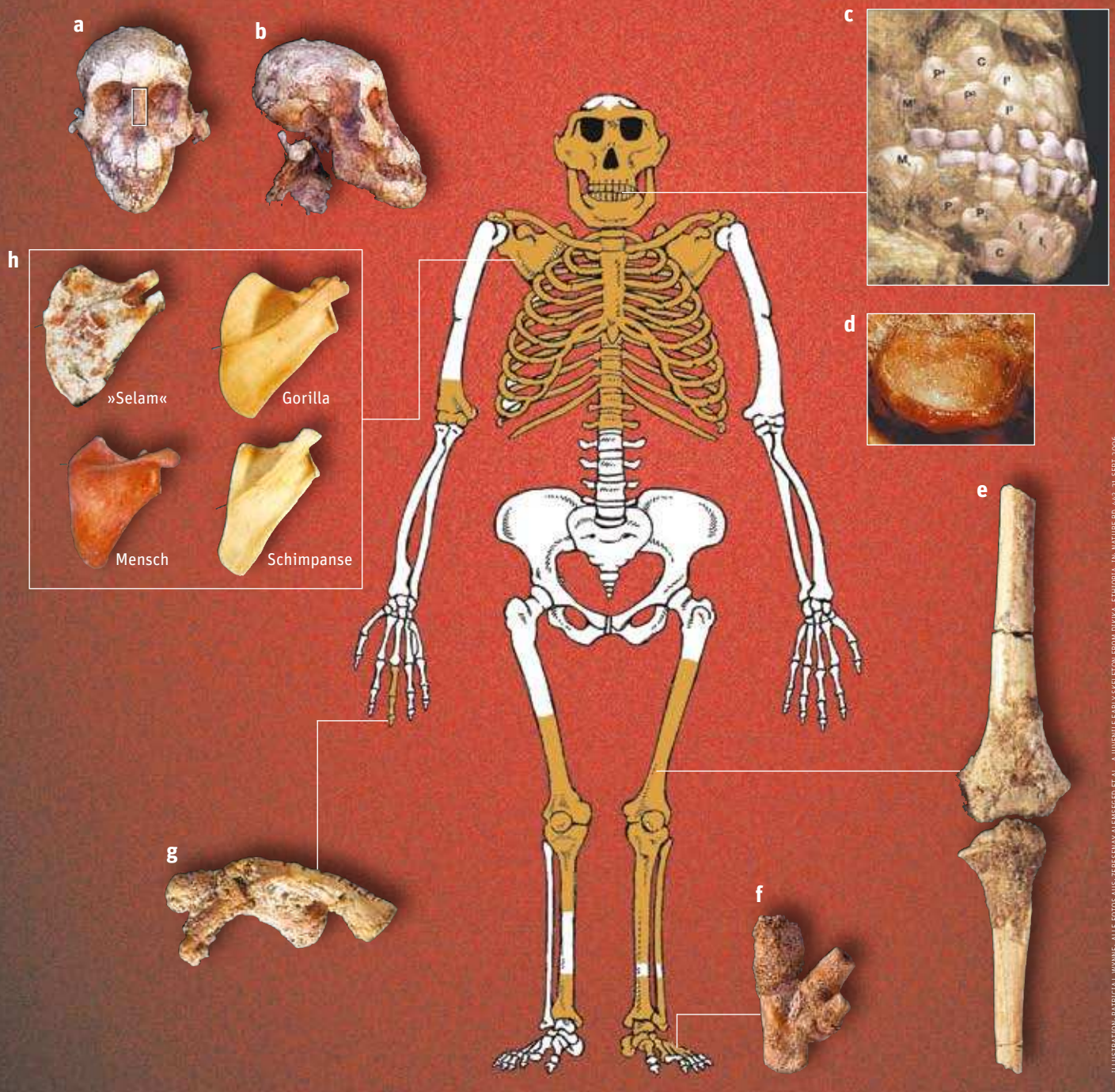


ILLUSTRATION: PATRICIA J. WYNNE; ALLE FOTOS AUS: ZERESENAY ALEMSEGED ET AL.: A JUVENILE EARLY SKELETON FROM DIKIKA, ETHIOPIA. IN: NATURE BD. 443, 21. SEPT. 2006

▷ können. Die Frage ist aber: War dies lediglich Ballast aus ihrer Vorgeschichte, den sie noch mitschleppten, ohne ihn groß zu nutzen, wie es das eine Lager der Anthropologen annimmt? Diese Forscher denken sich *A. afarensis* als eine im Prinzip rein am Boden lebende Art. Oder kletterten jene Vormenschen noch gut und gern durch die Bäume? Ein Teil der Anthropologen hält das für wahrscheinlich. Ihrer Meinung nach hätte sich diese Anatomie sonst nicht über Hunderttausende von Jahren erhalten.

Auch das Dikika-Mädchen besaß sowohl Beine zum Aufrechtgehen als auch Hände, die sich zum Klettern geeignet hätten. Erstmals aber sind von der Spezies die Schulterblätter überliefert, was für einigen Enthusiasmus sorgt. Alemseged sieht in deren Form die stärkste Ähnlichkeit mit Schulterblättern von Gorillas. So weist die Gelenkpfanne wie bei den Menschenaffen auch nach oben, während sie bei uns seitlich gerichtet ist. Alemseged stellt sich vor, dass das Mädchen die Arme leichter als wir über den Kopf heben konnte, so wie das kletternde Primaten machen – auch junge Gorillas, während die älteren Tiere vorwiegend am Boden bleiben.

Der rätselhafte Oberkörper

Weiteren Aufschluss brachte die Anatomie der Bogengänge im Innenohr für den Gleichgewichtssinn. Bei Selam konnten deren Proportionen mittels Computertomografie ermittelt werden. Wie sich zeigte, sieht diese Struktur recht ähnlich aus wie bei Menschenaffen – und auch ähnlich wie bei *A. africanus*, nicht aber so wie beim modernen Menschen. Bedeutet das, dass *A. afarensis* auf zwei Beinen noch nicht so wendig, sicher und schnell vorwärts kam wie der Mensch? Besagt es vielleicht außerdem, dass jene Vormenschen den Kopf noch weniger gut ohne Mitnahme des Rumpfes zu bewegen vermochten wie später die Menschen? Der frei bewegliche Kopf scheint bei unserer eigenen Gattung eine entscheidende Errungenschaft zu sein, die ausdauerndes Laufen erlaubt.

Dass Lucy und Artgenossen bereits echte Zweibeiner waren, deren Oberkörper sich aber dennoch für ein Baumleben eignete – zumindest in gewissem Grad –, vermuteten Jack T. Stern jr. von der Stony-Brook-Universität (New York) und seine Kollegen schon vor Jahren. Sterns Kommentar zu dem »Nature«- ▷

Was Leser wissen wollen

»Scientific American« veröffentlichte eine Vorversion des englischen Textes des Artikels auf seiner Internetseite. Die Leser wurden gebeten, die Autorin nach allem zu fragen, was sie über den Fund noch wissen wollten. Hier eine Auswahl der Fragen mit den Antworten von Kate Wong:

Wie hat man das Alter des Kindes festgestellt?
Anhand des Stadiums der Zahnentwicklung: Vergleicht man es mit dem von den afrikanischen Menschenaffen, dürfte das Kind ungefähr drei Jahre alt geworden sein. Ganz genau lässt sich das nicht sagen, denn sicherlich verlief das Wachstum von *A. afarensis* schon anders als das von Schimpansen und Gorillas.

Woran erkennen die Anatomen das Geschlecht des Kindes?
Die Kronen der bleibenden Zähne liegen noch im Knochen, sind aber teilweise schon voll ausgebildet und computertomografisch zu sehen. Forscher haben sie vermessen und mit Zähnen von *A. afarensis*-Fossilien verglichen, die von Erwachsenen stammen und deren Geschlecht festgestellt werden konnte. Demnach war das Dikika-Kind ein Mädchen.

Wie erfolgte die Altersbestimmung dieses frühen Fossils? Wie genau ist sie?
Diana C. Roman von der Universität von Südflorida in Tampa datierte vulkanische Ascheschichten unmittelbar über und unter dem Fossil. Demnach soll das Skelett zwischen 3,31 und 3,35 Millionen Jahre alt sein – eine Ungenauigkeit von nur 40 000 Jahren.

Haben die Forscher den Gesteinsblock durchleuchtet oder Ähnliches, um herauszufinden, was noch an Knochen darinsteckt?
Die Forscher nehmen wohl an, dass sie alle darin eingeschlossenen fossilen Knochen mindestens teilweise freigelegt haben. Höchstens ein paar ganz kleine Knochen könnten vielleicht noch komplett eingeschlossen sein. Jetzt scheint es darauf anzukommen, wie viel von den einzelnen Knochen tatsächlich noch da ist und welche Teile von ihnen erhalten sind. Mit Computertomografie wurden nicht nur die Anlagen der bleibenden Zähne erfasst, sondern auch der Bau des Innenohrs. Zum übrigen Skelett ist mir in dieser Hinsicht nichts bekannt.

Wozu die ganze Aufregung? Es ist doch bekannt, dass unsere Vorfahren irgendwann die Bäume verlassen haben. Noch heute klettern Kinder liebend gern auf Bäume. Vielleicht ist das ja eine unbewusste Erinnerung an unsere Vergangenheit.
Die Frage ist nicht, ob *A. afarensis* unter Umständen noch dazu fähig war, Bäume zu ersteigen – sondern vielmehr, wie gut sich die Art bereits an das Leben auf dem Boden angepasst hatte. Ein gewisses Klettervermögen wird diesen Vormenschen niemand absprechen. Doch es kommt darauf an, wie stark die Neigung noch war, dies auch wirklich zu tun. Das ist nicht trivial, gilt doch der Erwerb des aufrechten Gangs als ein Meilenstein der menschlichen Evolution. Dessen Auftreten möchten die Paläoanthropologen möglichst genau verstehen.

Existieren aus dem Umfeld des Kinderskeletts pflanzliche oder tierische Fossilien, die Auskunft über die damaligen Lebensbedingungen geben?
Ja. Nach den Tierfossilien muss die Umwelt abwechslungsreich gewesen sein, mit Waldbeständen und Grasland, auch mit permanenten Gewässern. In ähnlichen Verhältnissen lebten Lucy und andere Vertreter dieser Art.

Was hätte es den frühen Homininen gebracht, ausdauernd laufen zu können?
Die Forscher nehmen an, dass die Eigenschaft, recht weite Strecken auf zwei Beinen zu rennen, die Jagd beziehungsweise die Nutzung von Aas begünstigte und darum in der Evolution selektiert wurde. Diese Homininen konnten Beute vielleicht bis zu deren Erschöpfung hetzen oder gesichtete Kadaver schnell genug erreichen, bevor ihnen andere Fleischfresser zuvorkamen.

▷ Aufsatz über das Dikika-Kind: »Ich habe mich gefreut, dass ich vielleicht Recht hatte.«

Selbst Johanson gibt zu, für die These, dass sich diese Vormenschen zwischendurch auf Bäumen herumtrieben, gebe es nun stärkere Hinweise als früher: »Anfangs habe ich vehement die Meinung vertreten, dass *A. afarensis* ein reiner Zweibeiner war, der den Boden praktisch nicht mehr verließ.« In Anbetracht jüngerer Funde sei nun nicht mehr völlig auszuschließen, dass dieser Hominide auch noch immer Bäume als Lebensraum nutzte, sei es während der Nacht zum Schlafen oder um von altvertrauten Nahrungsquellen zu profitieren.

Ein Leben teils in den Bäumen, teils aufrecht gehend auf dem Boden würde zur damaligen Umwelt gut passen. Dikika ist heute ein weit gehend staubtrockenes Hügelland, wo nur vereinzelt einmal ein paar Sträucher oder einige Bäume wachsen. Vor 3,3 Millionen Jahren muss die Gegend dagegen völlig anders ausgesehen haben, wie die Ausgrabungen des Teams immer klarer erkennen lassen. Damals lag dort ein Flussdelta, das viel Wasser führte und von Wäldern gesäumt war. Es gab auch grasbewachsene Flächen. Hierzu meint das Teammitglied René Bobe von der Universität von Georgia in Athens: »Bei dieser Umwelt würde es nicht verwundern, wenn solch ein Affe bald auf Bäume geklettert wäre, bald sich unten auf dem Boden herumgetrieben hätte.«

Mosaikartige Evolution

Doch nicht alle Forscher stimmen dieser Ansicht zu. So hält C. Owen Lovejoy von der Kent-State-Universität (Ohio) nichts davon, dass die Schulterblätter von Selam denen eines Gorillas ähneln sollen. Recht primitiv würden sie zwar aussehen, aber doch mehr menschen- als gorillaähnlich. Lovejoy gehört zu den führenden Verfechtern der These, dass *A. afarensis* durch und durch ein Zweibeiner war, der auf dem Boden lebte. Nach seiner Einschätzung deuten Arme und Schultern dieser Vormenschen lediglich auf baumbewohnende Vorfahren hin. Dieses Kapitel sei abgeschlossen, seitdem 1978 bei Laetoli in Tansania jene berühmten Fußspuren gefunden worden seien, die aufrecht gehende Vertreter von *A. afarensis* in vulkanischer Asche hinterließen (siehe die Darstellung im Kasten rechts). Lovejoy betont, diese Hominiden hätten offenbar keine opponierbare Großzehe mehr gehabt, konnten mit dem Fuß also nicht mehr Äste umgreifen und darum nicht mehr gewandt klettern.

Immerhin sind sich die Experten darin einig, dass die einzelnen Körperteile unserer Vorfahren zu verschiedenen Zeiten an die neue Lebensweise angepasst wurden. Die Art *A. afarensis* sei »ein gutes Beispiel für eine Mosaikevolution«, kommentiert Johanson. »Da wird nicht einfach irgendein evolutionärer Schalter umgelegt, und schon entsteht

Kommentare von Paläoanthropologen

Die Autorin hat verschiedene Expertenmeinungen eingeholt:

John Hawks (Universität von Wisconsin in Madison) fragt sich, ob das Dikika-Skelett das Ende der Homininengattung *Kenyanthropus* besiegeln wird. Die Gattung wurde erst im Jahr 2001 etabliert und ihre Existenz ist unter den Forschern heftig umstrittenen. Die betreffenden Homininen hätten zeitgleich mit frühen Vertretern von *A. afarensis* gelebt. Den neuen Gattungsnamen gaben Paläoanthropologen einem Fossilfund bei Lomekwi am Turkanasee in Kenia, der aus einem 3,5 Millionen Jahre alten, ziemlich vollständigen Schädel, dazu aus Kieferfragmenten und einigen Zähnen besteht. Im Gegensatz zu den Entdeckern halten andere Forscher den Fund lediglich für eine regionale Variante von *A. afarensis*. Hawks hält es für bemerkenswert, dass die Entdecker von Selam den Fund von Lomekwi nicht einmal erörtern.

Ralph L. Holloway (Paläoneurologe an der Columbia-Universität, New York) verspricht sich vom Innenabdruck des Hirnschädels Aufschluss darüber, ob markante Strukturen der Hirnrinde eher wie bei Menschenaffen oder wie beim Menschen aussehen. Insbesondere könnten tiefe Hirnfurchen erkennbar sein, die solche Charakteristika anzeigen würden.

C. Owen Lovejoy (Kent-State-Universität, Ohio) ist der Ansicht, dass das Dikika-Kind die Diskussion über den Grad des Lebens auf dem Boden von *A. afarensis* nicht wieder aufheizt, sondern abschließt. Nach Lovejoy spricht alles für ein praktisch reines Bodendasein. Das Schulterblatt des Kindes ähnele in gewisser Hinsicht zwar auch dem von Gorillas, weniger dem von Schimpansen, vor allem aber erinnere es bereits erstaunlich an das des Menschen. Was die gebogenen Fingerknochen betrifft: Nach neueren Erkenntnissen kommen Menschenaffen schon so auf die Welt. Die Biegung entsteht nicht erst durch den Gebrauch. Bei *A. afarensis* könnte dies darum ein noch nicht ausgemerztes Erbmerkmal sein.

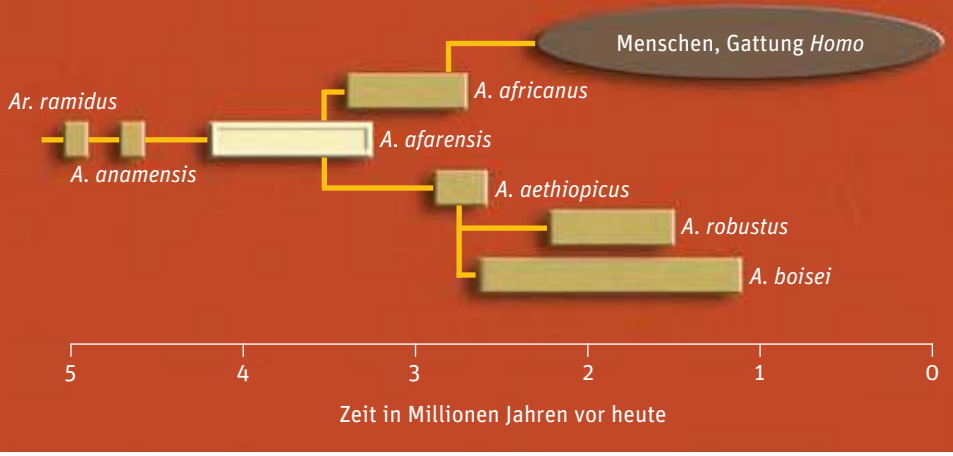
René Bobe (Universität von Georgia in Athens) gehört zu dem Team, das die früheren Umweltbedingungen am Fundort untersucht. Der Lebensraum zu diesem Fossil lässt sich fantastisch rekonstruieren. Die Pflanzen- und Tierwelt war damals üppig und abwechslungsreich. Schon wenig später setzten die Klimaumschwünge ein, die das Eiszeitalter einleiteten. Die Jahreszeiten waren gleichmäßiger als später, als die Gattung *Homo* entstand und erste Steinwerkzeuge gefertigt wurden.

William E. H. Harcourt-Smith (American Museum of Natural History, New York) glaubt, dass reine, vollständig auf dem Boden lebende Zweibeiner erst mit der Gattung *Homo* auftraten. Nicht nur Arme und Schultergürtel, auch der Bau des Innenohrs, welches das Gleichgewichtsorgan enthält, wirke bei *A. afarensis* noch affenähnlich. Deswegen dürften sich diese Primaten noch regelmäßig in den Bäumen bewegt haben. Harcourt-Smith ist gespannt zu erfahren, ob das Dikika-Kind die große Zehe noch so bewegen konnte, dass es mit den Füßen Äste zu umgreifen vermochte.

(Die vollständigen, englischen Originaltexte finden Sie auf der Website von »Scientific American« unter www.sciam.com/ontheweb unter Dezember 2006.)

Die Verwandtschaft der Menschen

Teilweise ist die Abstammung der einzelnen Vormenschenarten noch strittig. Nach Auffassung der meisten Anthropologen gehört *Australopithecus afarensis* zu den Vorfahren der Gattung *Homo*, der Menschenarten. Mehrere Individuen von *A. afarensis* hinterließen in Laetoli Fußspuren, die einen aufrechten Gang beweisen (Szene rechts).



AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY, NEW YORK (AUSSCHNITT AUS DEM DIORAMA ZU DEN LAETOLI-SPUREN)

aus einem vierbeinigen Primaten ein aufrecht gehender Mensch.« Vielmehr scheinen Selektionskräfte, die den aufrechten Gang voranbrachten, zuerst die Hinterbeine und das Becken umgebildet zu haben. Auf die Arme und die Schulterpartie sei es dabei zunächst wohl nicht vordringlich angekommen. Solche Körperteile konnten darum später umgebaut werden. Die Reihenfolge dieser körperlichen Umgestaltung im Zuge der Menschwerdung, betont Johanson, würden die Anthropologen nun immer besser herausarbeiten.

Schon verlängerte Kindheit und längeres Lernen?

Nicht weniger spannende Einblicke liefert der Schädel des Kindes von Dikika. Denn auch dessen Merkmale zeugen durchaus von keiner konformen, gleichlaufenden Evolution.

Zum Beispiel ist das Zungenbein Selams überliefert – erstmals bei dieser Art. Der zarte, mit Zunge und Kehlkopf verbundene gebogene Knochen im Mundboden hat sich nur höchst selten fossil erhalten. Aus seiner Form schließen Anthropologen auch auf das Sprechvermögen früherer Hominiden. Das Zungenbein Selams lässt vermuten, dass *A. afarensis* noch luftgefüllte Kehlsäcke besaß, somit der Kehlkopf vermutlich noch ähnlich wie bei Menschenaffen aussah. Der Hirnschädel dagegen, oder vielmehr das Gehirn, wirkt bereits ein wenig menschenähnlich. Alemsegeds Team hat errechnet, dass das kleine Mädchen in Bezug zu dem erwachsener Individuen ein für sein Alter recht kleines Gehirn hatte – sofern man das mit der Hirngröße junger Menschenaffen vergleicht. Ein Schimpanse erreicht mit drei Jahren bereits über 90 Prozent der endgültigen Gehirngröße. Bei Selam waren es wohl nur zwischen 65 und 88 Prozent. Bedeutet dies, dass das Gehirnwachstum bei den Kindern von *A. afarensis* länger andauerte, ein Merkmal, das sich später beim Menschen stark ausprägte?

Um zu erkennen, inwieweit diese Befunde für *A. afarensis* repräsentativ und die Schlussfolgerungen gültig sind, wären mehr solche Skelette, zudem von Kindern verschiedenen Alters, nötig. Doch auch das Dikika-Mädchen wird den Forschern sicherlich noch vieles mehr über unsere Vorfahren verraten. Die Paläoanthropologin Carol V. Ward von der Universität von Missouri in Columbia verspricht sich von dem sensationellen Fund vor allem Einsichten in Wachstum und Entwicklung von *Australopithecus*-Kindern im Vergleich zu Menschenaffen und Menschen, und zwar »nicht nur für einzelne Körperteile, sondern auch für die Verhältnisse von deren Ausbildung zueinander«.

Alemseged schätzt, dass es noch mehrere Jahre dauert, bis er die Fossilien sämtlich vom Sandstein gereinigt hat. Erstmals werden die Anthropologen dann ein Kinderskelett unseres vermuteten Ahnen *Australopithecus afarensis* vor sich haben – das fast vollständige Skelett einer Dreijährigen. Sie werden versuchen, daran ein Bild über die Kindheit dieser Vormenschen zu zeichnen. ◁

Kate Wong ist leitende Redakteurin der Online-Seiten von Scientific American (www.sciam.com).

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

A juvenile early hominin skeleton from Dikika, Ethiopia. Von Zeresenay Alemseged et al. in: Nature, Bd. 443, 21. September 2006, S. 296

Geological and palaeontological context of a pliocene juvenile hominin at Dikika, Ethiopia. Von Jonathan G. Wynn et al. in: Nature, Bd. 443, 21. September 2006, S. 332

From Lucy to Language. Von Donald Johanson und Blake Edgar. Simon & Schuster, 2006

Evolution des Menschen II. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2004

Evolution des Menschen. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 4/2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/861877.

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

GEOTHERMIE

Schöne Grüße von Vulcanus

Zähmen lässt sich das Feuer der Vulkane zwar nicht, mitunter aber zur Energiegewinnung nutzen.

Von Bernhard Gerl

Wenn der Ätna Feuer spuckt oder der Merapi auf Java ausbricht, geben die dramatischen Bilder in den Fernsehnachrichten eine Ahnung davon, welche gewaltige Hitze tief unter unseren Füßen brodelt. Für Griechen und Römer war klar, dass der feurigen Natur der Vulkane eine machtvolle Gottheit innewohnen musste. Deutlich ziviler äußert sie sich in Form von Thermalquellen und Geothermiekraftwerken. In Ländern, in denen noch Vulkane aktiv sind oder die über so genannten Hotspots liegen, hat diese Form der Energienutzung schon länger Tradition. Island ist dabei Spitzenreiter: Geothermie deckt dort mehr als die Hälfte des Bedarfs an Wärme und Strom. Doch auch für Staaten, in deren unteren Stockwerken es gemütlicher zugeht, wird diese umweltfreundliche und klimaschonende Technologie zunehmend interessant.

Bergleute wissen, dass die Temperatur pro hundert Meter Tiefe um etwa drei Grad Celsius ansteigt. In einem drei Kilometer tiefen Schacht sollte es also zwischen 80 und 120 Grad Celsius warm sein, in fünf Kilometer Tiefe gar 130 bis 160 Grad. Führen diese Gesteinsschichten zudem Wasser, lässt es sich in einem Bohrloch nach oben fördern, durch einen Wärmetauscher leiten und dann wieder in die Tiefe pumpen. Doch Tiefbohrungen sind schwierig und sehr kostspielig. Am Ende kann sich herausstellen, dass die betreffende Schicht nicht genug Wasser führt oder nicht gut getroffen wurde.

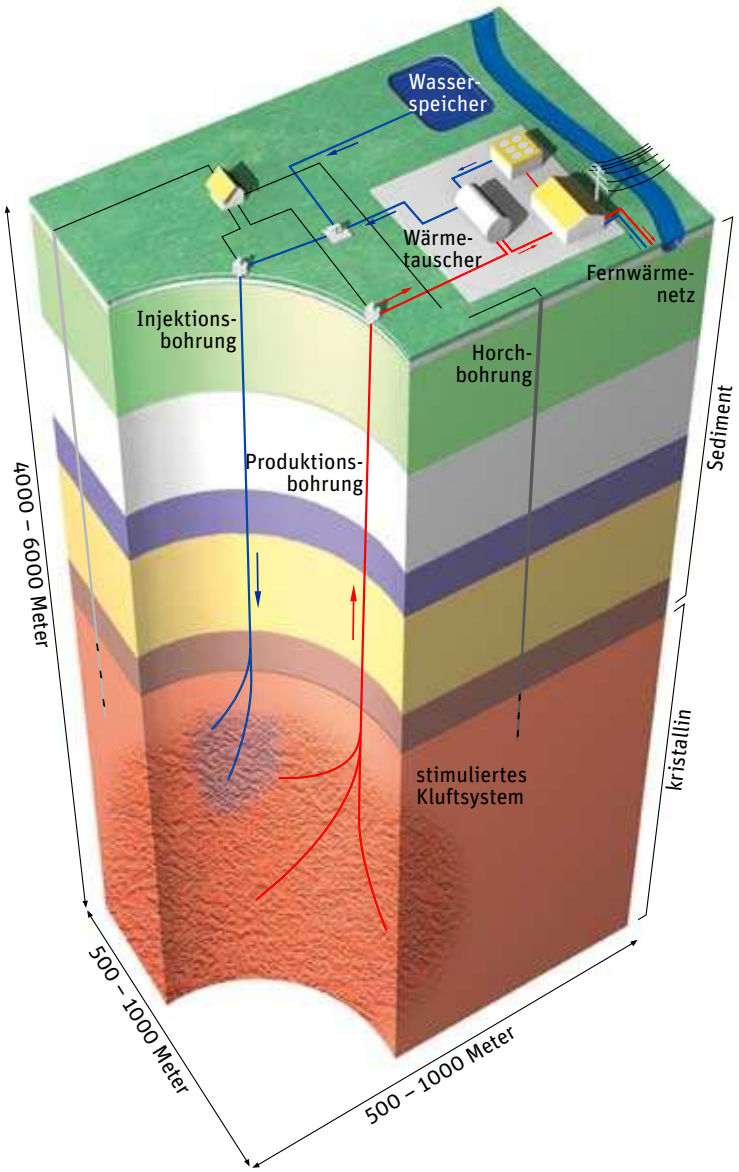
Das Hot-Dry-Rock-Verfahren macht vom Grundwasser unabhängig. Man benötigt lediglich zwei Bohrlöcher und presst dann Wasser mit 200- bis 300-fachem Atmosphärendruck durch das heiße Gestein. Auf diese Weise wird es aufgesprengt und durchlässig gemacht. Die Kräfte, die dabei wirken, sind beträchtlich: Im Dezember 2006 wurde durch eine derartige »Sprengung« in der Region Basel ein Erdbeben der Stärke 3,4 ausgelöst, in El Salvador wurde 2003 sogar 4,4 auf der Richterskala gemessen. Warum dergleichen geschieht, wissen die Experten noch nicht. Vermutlich verstärkt das Einpressen mechanische Spannungen in tiefen Gesteinszonen. Bislang hatten Bohrungen bis vier Kilometer Tiefe keine Beben zur Folge, in Basel war man fünf Kilometer in die Erdkruste vorgestoßen.

Durch Erdwärme erhitztes Wasser ist oft noch zu kalt, um bereits effektiv Turbinen anzutreiben. Darum gibt es in einem Wärmetauscher seine Energie an ein Medium ab, das schon bei Temperaturen von beispielsweise 50 Grad Celsius siedet. Dieses verdampft und treibt eine Turbine an.

Stand der Technik war bis vor Kurzem das ORC-Verfahren *(Organic Rankine Cycle)*. Die hier eingesetzten Medien sind Fluorchlorkohlenwasserstoffe mit Siedepunkten zwischen minus 40 und plus 50 Grad Celsius oder Kohlenwasserstoffisobutan mit einem Siedepunkt von minus 11,7 Grad Celsius. Diese Verbindungen können aber die Umwelt schädigen. Modernere Anlagen verwenden deshalb das nach dem russischen Ingenieur Alex Kalina benannte Verfahren, bei dem ein Wasser-Ammoniak-Gemisch als Arbeitsmittel verwendet wird. Vorteil hier: Es kann weit über den Siedepunkt des Ammoniaks von minus 33,7 Grad Celsius hinaus erhitzt werden. Die Temperatur einer reinen Flüssigkeit dagegen steigt nur bis zum Siedepunkt, dann verdampft sie. Das flüssige Gemisch Alex Kalinas aber vermag auch über den Siedepunkt hinaus noch Wärme aufzunehmen. Das verbessert den Wirkungsgrad des Wärmetauschers.

Die Stadt Unterhaching bei München hat das Glück, dass 3300 Meter unter ihr eine Wasser führende Schicht durch 122 Grad Celsius heißes Gestein fließt. Aus diesem Grund wird dort eine solche Geothermieanlage gebaut. Die Techniker rechnen mit einer Leistung von 3,36 Megawatt – damit lassen sich etwa 6000 Vier-Personen-Haushalte mit Strom versorgen. Neben elektrischer Energie wird das Wasser auch Heizwärme für etwa die Hälfte der 20 000 Einwohner der Stadt liefern. Dazu werden 25 von den 150 pro Sekunde geförderten Litern abgezweigt und in ein Fernwärmenetz gespeist. Die Bohrungen wurden 2004 beendet, das Heizwerk wie auch die Anlage zur Stromerzeugung sind bereits fertig gestellt, im November 2007 soll die komplette Anlage im Betrieb sein – und jährlich den Ausstoß von 12 000 Tonnen Kohlendioxid, sieben Tonnen Schwefeldioxid und fast elf Tonnen Stickstoffoxiden einsparen. So macht man Häuser warm, ohne das Weltklima zu verändern. ◁

Der Autor **Bernhard Gerl** arbeitet als freier Fachjournalist in Mainz.



Beim Hot-Dry-Rock-Prinzip wird das Gestein in der Tiefe durch Wasserdruck gesprengt und es entstehen Verbindungen zwischen zwei Bohrlöchern. Nun kann eine Injektionspumpe kaltes Wasser (blau) in die warme Schicht pressen. Es erwärmt sich im zerklüfteten Gestein und wird wieder an die Oberfläche gepumpt (rot). Dort entzieht ein Wärmetauscher dem Wasser die Energie zur Strom- und Wärmeproduktion.

Wussten Sie schon?

▶ Ein Geothermiekraftwerk nutzt wirklich eine **erneuerbare Energie**, denn die Wärme im Erdinneren wird nachgeliefert, wenn auch langsamer, als sie das Kraftwerk abführt. Die Energiequelle: zu etwa einem Drittel die Restwärme aus der Zeit der Erdentstehung, zu zwei Dritteln der Zerfall der radioaktiven Elemente Uran und Thorium in der Erdkruste. Ein Gesteinsblock von einem Kubikkilometer könnte 30 Jahre lang 300 Megawatt liefern und würde dabei von 200 auf 100 Grad abgekühlt. Theoretisch reichte allein die in den oberen drei Kilometern der Erdkruste gespeicherte Energie aus, um die Welt 100 000 Jahre lang zu versorgen.

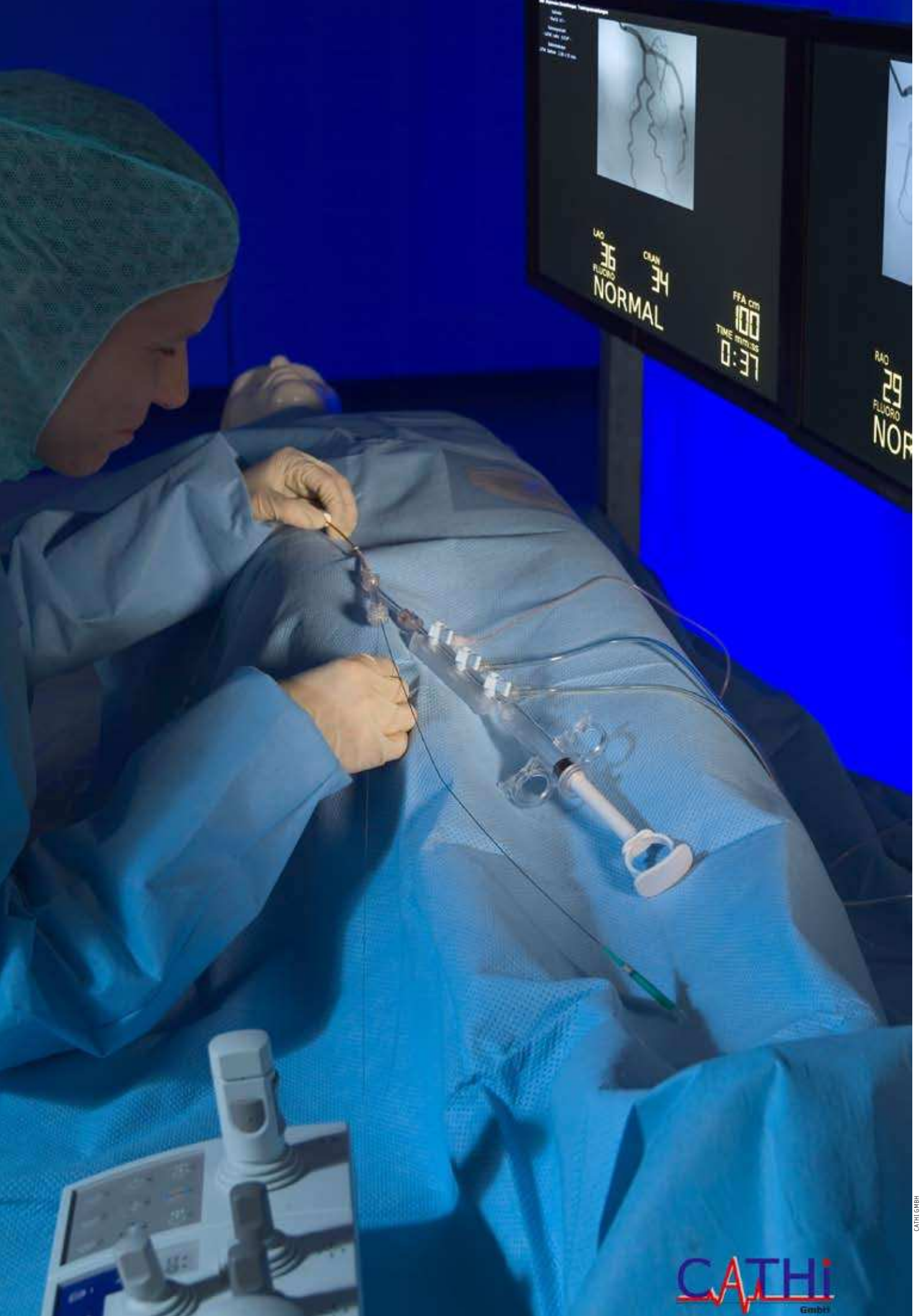
▶ Auch **oberflächennahes Grundwasser** hat eine konstante Temperatur von 7 bis 12 Grad und kann deshalb mittels Wärmepumpen zum Heizen genutzt werden kann. Der Ursprung dieser Wärme ist aber gespeicherte Sonnenenergie und hat mit Geothermie wenig zu tun.

▶ Das in Deutschland geltende Erneuerbare-Energien-Gesetz ermöglicht eine **verlässliche finanzielle Förderung** regenerativer Energien, etwa durch einen garantierten Strompreis von 15 Cent pro Kilowattstunde. Deshalb können Geothermiekraftwerke langfristig rentabel arbeiten, auch wenn der Wirkungsgrad – also die Relation von elektrischer Bruttoleistung zu zugeführter Wärme – mit 12,5 bis 14 Prozent nicht sehr hoch ist. Weltweit werden durch Geothermieanlagen rund acht Gigawatt Leistung pro Jahr erzeugt, das entspricht etwa 0,06 Prozent des Primärenergieverbrauchs der Menschheit.

▶ **In vulkanisch aktiven Zonen** gibt es Heißdampfquellen. Bereits 30 Grad warmes Wasser genügt, um ein Thermalbad zu versorgen. Entweicht heißer Dampf von über 180 Grad Celsius aus der Erde, können sogar Dampfturbinen zur Stromerzeugung damit angetrieben werden. Im italienischen Larderello gibt es eine solche Anlage bereits seit 1904. Sie erzeugt heute eine Leistung von 545 Megawatt, ungefähr so viel wie ein modernes Kohlekraftwerk.

▶ Wie bei der Suche nach Erdöl wird für die Bohrungen das **Drehbohrverfahren** eingesetzt. Am Ende des Bohrgestänges sitzt ein diamantbesetzter Bohrkopf. Wasser, das durch das Gestänge gepresst wird, spült das zerriebene Gestein nach oben. Mit etwa vierzig Prozent der Kosten für das gesamte Geothermiekraftwerk sind die Bohrungen der teuerste Einzelposten. Will man die Erdwärme nur zum Heizen verwenden, reicht manchmal eine einzige Bohrung, durch die Wasser in das heiße Gestein gepresst und weiter unten wieder entnommen wird. Für die Stromerzeugung ist aber die Fläche, an der das heiße Gestein Wärme an das Wasser abgeben kann, zu klein.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM, NACH: GEOTHERMAL EXPLORERS LTD., DR. MARKUS HÄRING

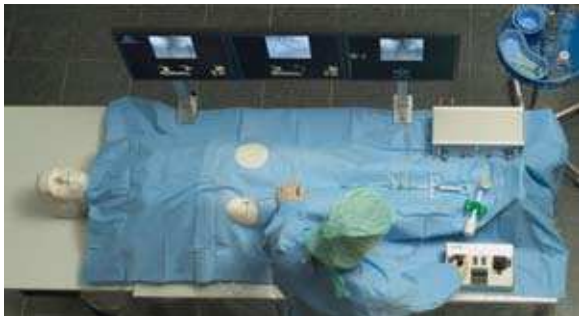

LAO
36
FLUORO
NORMAL
CRAN
34
FFA cm
100
TIME mm:ss
0:37
RAO
29
FLUORO
NOR

CATHI GMBH

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Operations-Trainingssysteme in der Medizin

Schlüssellochchirurgie will gelernt sein – aber möglichst nicht am lebenden Patienten. Der angehende Arzt übt die schwierigen Techniken an einem künstlichen Ersatz, der ihm durch ausgefeilte Computersimulationen eine lebensechte Operationssituation vorspiegelt.



CATHI GMBH

Die Ausstattung ist wie in einem echten Katheterlabor (siehe auch das Bild links). Aber auf dem Tisch liegt statt eines Patienten eine Puppe, und die Bilder auf den Monitoren kommen nicht von einer Röntgenkamera, sondern sind durch ein Computerprogramm errechnet. Mit dem System Cathi kann man den Ernstfall einer Ballondilatation üben, ohne dass ein Tropfen Blut fließt.

Von Daniel Gembris, Jürgen Hesser und Reinhard Männer

Minimalinvasive Verfahren (»Schlüssellochchirurgie«) haben die Chirurgie in den letzten Jahrzehnten revolutioniert. Mit millimetergroßem Gerät kann der Arzt Engstellen in Herzkranzgefäßen von innen heraus wieder erweitern und Wucherungen im Darm ohne offene Operation entfernen. Das Verfahren erspart dem Patienten nicht nur den großen Schnitt mitsamt den zugehörigen Belastungen, sondern eröffnet auch neue, ungeahnte Möglichkeiten. So erreicht seit wenigen Jahren der Augenchirurg mit seinen Miniaturinstrumenten die Netzhaut an der hinteren Wand des Auges, ohne die Linse oder den dahintergelegenen Glaskörper zu beeinträchtigen.

Die neue Technik stellt allerdings hohe Ansprüche an die manuelle Geschicklichkeit des Arztes. Bei einer Operation an der Netzhaut kann ein Fehlgriff von nur einem Zehntelmillimeter das Auge vollständig erblinden lassen.

Wie kann man die notwendige Fingerfertigkeit erlernen? Ein gebräuchliches Verfahren ist das Üben am so genannten Tiermodell. Beispielsweise operiert der angehende Chirurg zu Trainingszwecken am Auge eines toten Schweins. Allerdings sind die Tierorgane anatomisch oft völlig anders aufgebaut als die des Menschen, sodass die erworbenen Fähigkeiten nur ansatzweise übertragbar sind. Zudem sind viele Krankheitsbilder des Menschen im Tiermodell nicht vorhanden. Daher erlernt der Mikrochirurg auch heute noch in der Regel sein Handwerk, indem er unter der Aufsicht eines erfahrenen Kollegen direkt am Patienten operiert. Da er behutsam in die Komplexität der Eingriffe eingeführt werden muss, dauert eine solche Ausbildung typischerweise mehrere Jahre. Selbst in dieser langen Zeit pflegen die selteneren Komplikationen nicht so oft aufzutreten, dass man den Umgang mit ihnen angemessen üben könnte. Nur zu oft gerät daher der fertig ausgebildete Arzt in völlig neue Situationen und muss improvisieren. Dabei macht er naturgemäß mehr Fehler, mit entsprechenden Konsequenzen für den Patienten.

Wir können eine wesentlich risikoärmere Ausbildungsform anbieten: die computergestützte Simulation. Ein solches Trainingssystem beruht auf dem Prinzip der Virtuellen Realität: Der Arzt sieht am Simulator die gleichen Bilder und fühlt die gleichen Widerstände und Kräfte wie bei einer richtigen Operation. Bilder wie Kräfte werden jedoch von einem Rechner erzeugt und in geeigneter Weise präsentiert.

So beobachtet ein Netzhautchirurg in der Realität das Operationsfeld unter einem Stereomikroskop und arbeitet mit einer Pinzette, die er in das Auge eingeführt hat. In der virtuellen Realität tritt an die Stelle des Patientenauges eine Attrappe. Der Rechner registriert die Bewegung der Pinzette und setzt sie in Bilder um. Auf einem dem Stereomikroskop nachempfundenen Display sieht der Arzt eine virtuelle Pinzette, die sich genauso bewegt wie die echte. Auch das Auge und das Krankheitsbild sind virtuell, das heißt, sie existieren nur als Modelle im Rechner und können jederzeit nach Belieben ausgewechselt werden. Das System kann dem Arzt auch seltene Komplikationen so oft präsentieren, bis er den Umgang mit ihnen beherrscht. ▷

▷ Zudem werden die Leistungen verschiedener »Schüler« vergleichbar, weil sie alle mit den gleichen »Fällen« konfrontiert werden.

Wenn der Arzt mit der Pinzette zugreift, wird die Reaktion des Gewebes in Echtzeit berechnet und in dem virtuellen Stereomikroskop dargestellt. So erlebt der Arzt unmittelbar, dass die Netzhaut blutet, wenn er sie verletzt – obwohl sie im Simulator nicht physisch existiert. Ein solches Simulationssystem hilft dem Arzt insbesondere, die Koordination seiner Hände und seiner Augen zu trainieren, an die bei den beschriebenen Operationen besonders hohe Anforderungen gestellt werden.

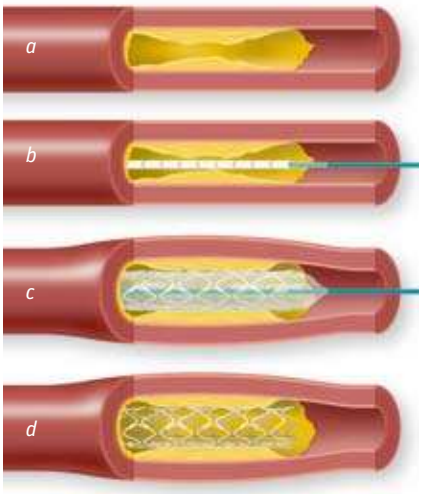
Eine realistische Nachbildung der Operationsabläufe setzt besonders leistungsfähige Rechner und schnelle Programme voraus. Der trainierende Arzt muss in den Zustand der »Immersion« versetzt werden, in dem er sich ungestört der Illusion hingeben kann, er operiere nicht in der virtuellen, sondern in der echten Welt. Damit dies gelingt, muss jede seiner Aktionen unmittelbar zu einer Reaktion des Systems führen. Bewegt er die Pinzette, so muss der Computer deren neue Position bestimmen, die Auswirkungen der Bewegung auf das Gewebe berechnen und das Ergebnis bildlich darstellen, und das alles ungefähr fünfzigmal pro Sekunde. Bei einer langsameren Bildfolge und entsprechend längerer Verzögerung empfindet der Arzt das Verhalten des Systems als unnatürlich, und die Illusion geht verloren. Um diese kurze Reaktionszeit zu erreichen, muss die ganze Kette der Datenverarbeitungsschritte optimiert werden, angefangen von der Positionsvermessung der Operationsinstrumente über die biomechanische Simulation der beteiligten Gewebe bis hin zur Computergrafik.

Der Einsatz von virtueller Realität zum Training ist nicht neu. Das bekannteste Beispiel ist der Flugsimulator zur Ausbildung von Piloten. Operationstrainingssysteme werden seit etwa fünfzehn Jahren entwickelt. Allerdings hat ihr praktischer Einsatz erst in letzter Zeit deutlich zugenommen, nachdem Studien ihre Effizienz belegt haben. Mittlerweile ist für besonders anspruchsvolle Operationen das vorhergehende Training an einem Simulationssystem sogar zwingend vorgeschrieben, so zum Beispiel von der amerikanischen Gesundheitsbehörde FDA für Kathetereingriffe an der Halsschlagader.

Das Institut für Computerunterstützte Medizin (ICM) der Universitäten Mannheim und Heidelberg mit Standort in Mannheim ist führend bei der Entwicklung realitätsnaher Trainingssysteme für die Medizin und hat in diesem Bereich schon zwei Firmen ausgegründet. Bis heute haben wir drei verschiedene Trainingssysteme realisiert:

- Cathi *(Catheter instruction system)* für Eingriffe an Blutgefäßen,
- Eyesi *(Eye surgery simulator)* für Augenoperationen und
- EndoSim *(Endoscopic Simulator)* für endoskopische Eingriffe im Darm.

Diese drei Systeme wollen wir im Folgenden vorstellen. Sie basieren zwar auf grundlegend verschiedenen Computerprogrammen, haben aber große Gemeinsamkeiten in der Grafik, der Simulation der physikalischen Wechselwirkungen von Instrument und Gewebe sowie der Konstruktion der Eingabesysteme.



Herzinfarktbehandlung durch Ballondilatation: In die verengte Stelle der Koronararterie *(a)* wird ein Ballon eingeführt *(b)* und aufgeblasen *(c)*, wodurch die Ablagerungen in die Arterienwand gedrückt werden. Der mit dem Ballon zusammen auf die richtige Weite gedehnte Stent bleibt zur Stabilisierung zurück *(d)*.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

Cathi: Orientierung im Geäst der Herzkranzgefäße

Der Herzinfarkt gehört in der westlichen Welt zu den häufigsten Todesursachen. Er entsteht dadurch, dass eine der das Herz versorgenden Arterien, ein Herzkranzgefäß, sich durch Ablagerungen an der Innenwand verengt oder gänzlich verschließt. Mangels Blutversorgung erbringt der entsprechende Teil des Herzmuskels seine Leistung nicht mehr oder stirbt sogar ab. Je größer der Infarktbereich, desto eher droht der Tod des Patienten. Eine klassische Therapie ist der Bypass. Man öffnet den Brustkorb des Patienten und legt eine Umleitung an dem verstopften Gefäß vorbei. Wesentlich unblutiger ist die perkutane transluminale Coronar-Angioplastie (PTCA), auch Ballondilatation genannt: Man macht die Engstelle wieder durchlässig, indem man die Ablagerungen in die Wand hineinpresst. Dazu muss man einen Ballon an die richtige Stelle bringen und mit hohem Druck (bis über 30 bar)

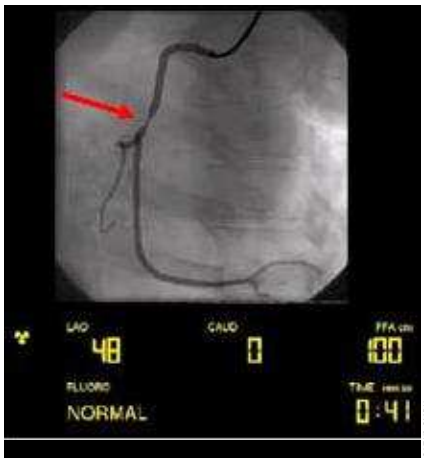
aufblasen. Damit nach dieser Behandlung das Gefäß weiterhin offen bleibt, stabilisiert man es, indem man an der bisherigen Engstelle ein steifes Drahtgeflecht, einen so genannten Stent, einsetzt (Bild links). Die PTCA ist mittlerweile ein Routineeingriff, der allein in Deutschland über 200 000-mal pro Jahr praktiziert wird.

Die einzelnen Schritte dieser Operation erfordern beträchtliches Fingerspitzengefühl. An der Leiste, manchmal auch im Arm, bringt der Kardiologe über eine Hohlnadel einen Führungskatheter, einen flexiblen Schlauch mit einem Außendurchmesser von etwa zwei Millimetern, in die Arterie ein und schiebt ihn entgegen dem Blutstrom durch die Aorta bis zu der Stelle, wo die Herzkranzgefäße abzweigen, dem so genannten Ostium.

Der nächste Schritt ist die Diagnose unter Röntgendurchleuchtung. Da die Gefäße dieselbe Röntgendichte haben wie das umliegende Gewebe, müssen sie durch ein Kontrastmittel sichtbar gemacht werden, das Röntgenstrahlen absorbiert und daher im Röntgenbild schwarz erscheint. (Im traditionellen Röntgenbild wäre es weiß statt schwarz; aber hier wird das ganze Röntgenbild zur besseren Sichtbarkeit invertiert wie beim Übergang vom fotografischen Negativ zum Positiv.) Diese – in der Regel jodhaltige – Flüssigkeit wird durch den Katheter injiziert und mit dem Blutstrom in die Herzkranzgefäße transportiert. Verengungen (Stenosen) oder Verschlüsse (Thromben) zeichnen sich dann dadurch im Röntgenbild ab, dass eine dicke schwarze Linie dünn wird oder plötzlich endet (Bild rechts). Das sieht man allerdings nur, wenn die Röntgenkameras im richtigen Winkel zum Gefäß orientiert sind und ihr Kontrast geeignet eingestellt ist. Diese Justierung erfordert ein hohes Maß an Erfahrung.

Hat der Arzt eine behandlungsbedürftige Engstelle gefunden, schiebt er durch den schon gelegten Katheter einen dünnen Draht. Dieser ist am Ende leicht gebogen, aber so weich, dass er innerhalb des Katheters eine gestreckte Form annimmt. Erst wenn er am Ende austritt, krümmt er sich wieder. Indem der Arzt ihn am hinteren Ende dreht, kann er ihn an Abzweigungen in die gewünschte Richtung bis zur Engstelle und durch sie hindurch lenken; welche Abzweigung die richtige ist, muss er dem Röntgenbild entnehmen.

Hat der Draht die Engstelle passiert, dient er als Führungsschiene für den Ballon und möglicherweise den Stent, die beide mit Kathetern zum Zielort geschoben werden. Mit deren Aufdehnung ist die Operation beendet.



So stellt der Simulator Cathi ein von Kontrastmittel durchflossenes Herzkranzgefäß dar. Die Stenose ist durch einen roten Pfeil markiert.

Es leuchtet unmittelbar ein, dass dieser Eingriff einschließlich der Maßnahmen bei Komplikationen viel Übung erfordert. Andererseits ist für intensives Üben wenig Raum, wenn ein Patient mit einem lebensgefährlichen Herzinfarkt auf dem Operationstisch liegt. Einen Ausweg aus dem Dilemma bietet der Simulator Cathi. Er ist das Werk von Ulrike Kornmesser, die ihn in ihrer Dissertation in Mannheim entwickelt hat und mittlerweile Geschäftsführerin der gleichnamigen Firma ist.

Auf den ersten Blick sieht Cathi aus wie ein Ausschnitt aus einem echten Katheterlabor (Eröffnungsbild). Wir verwenden die Originalinstrumente wie Kontrastmittelspritzen, Drähte und Katheter. Lediglich Patient und Röntgenanlage sind virtuell.

Bewegt der Arzt Draht oder Katheter, wird das über ein spezielles Trackingsystem gemessen und dem System mitgeteilt. Dieses bestimmt, wie sich das Instrument im virtuellen Gefäßbaum bewegt, und errechnet ein entsprechendes Röntgenbild des Patienten, in dem das Instrument geometrisch korrekt eingezeichnet wird. Injiziert der Arzt Kontrastmittel, so wird dem System mitgeteilt, wie viel Kubikzentimeter pro Sekunde aus dem Katheter strömen. Der Computer simuliert daraufhin anhand eines physikalischen Modells die Ausbreitung des Kontrastmittels im Gefäß ▷

Kollisionserkennung

Objekte in der virtuellen Welt können ebenso wie in der realen Kräfte aufeinander ausüben, etwa die für die Operation verwendete Pinzette auf die Netzhaut. Praktisch bedeutsam sind nur Kräfte durch unmittelbaren Kontakt; es kommt also darauf an, welche Gegenstände einen sehr geringen Abstand voneinander haben. Wollte man jedoch bei n Gegenständen sämtliche Abstände zwischen je zweien von ihnen bestimmen, müsste man ungefähr $n^2/2$ solcher Abstände berechnen. Da in der virtuellen Welt eine Pinzette oder eine Membran aus mehreren tausend Dreiecken besteht, wären das Millionen von Rechenoperationen. Dieser Aufwand lässt sich auf zwei Wegen drastisch reduzieren.

▶ **Vereinfachung der räumlichen Struktur:** Man teilt den Raum in Einheiten gleicher Größe auf, ähnlich den Fächern in einem Regal. Die Dreiecke jedes Objekts werden in diese Fächer einsortiert (wobei möglicherweise ein Dreieck in mehrere Fächer gerät). Kollisionen können nur zwischen Dreiecken stattfinden, die im selben Fach liegen. Die genauere Untersuchung kann sich daher auf den Inhalt der einzelnen Fächer beschränken, was die Anzahl der Rechenoperationen auf einige tausend reduziert.

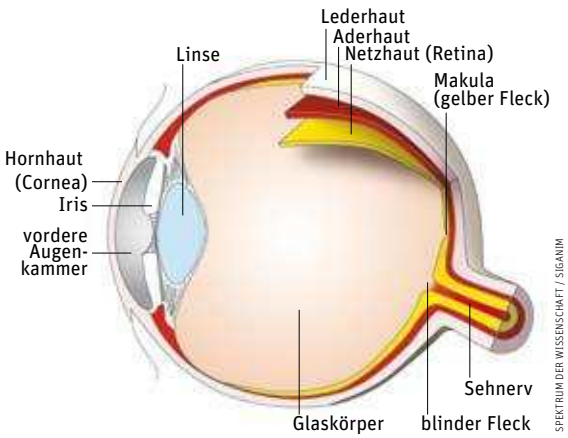
▶ **Vereinfachung der Objektstruktur:** Man konstruiert einfache geometrische Körper, beispielsweise Quader, welche die Objekte enthalten. Wenn zwei dieser Quader keinen Punkt gemeinsam haben, können auch die in ihnen enthaltenen Objekte nicht kollidieren. Wenn doch, kann man die betroffenen Quader – und nur diese – in Teilquader zerlegen, dadurch die Anzahl der denkbaren Kollisionen weiter reduzieren, die verbleibenden Teilquader nochmals zerlegen und so weiter. So hält sich der Rechenaufwand auch dann in Grenzen, wenn man einer genaueren Simulation zuliebe die Objekte durch noch mehr noch kleinere Dreiecke darstellt.

▷ und färbt die Gefäßstrukturen im Bild entsprechend ein.

Das System weiß also gewissermaßen, wie die Herzkranzgefäße des virtuellen Patienten verlaufen. Genauer gesagt: Es hat verschiedene Gefäßgeometrien vorrätig, die es zu Übungszwecken einspielen kann. Diese haben wir aus Röntgenbildern rekonstruiert, die während normaler Eingriffe an Patienten aufgenommen wurden. Dabei nutzen wir aus, dass in manchen Katheterlaboren so genannte Biplanaranlagen stehen, die gleichzeitig zwei Röntgenbilder in zueinander senkrechten Richtungen aufnehmen. Wie beim gewöhnlichen beidäugigen Sehen kann man durch Verknüpfung der Informationen aus beiden Bildern auch die Entfernung des Objekts von der Kamera erschließen. Bezieht man zusätzlich noch Wissen über charakteristische Eigenschaften der Gefäße mit ein, beispielsweise dass ein Gefäß nicht scharf umknickt, nicht blind endet und seinen Durchmesser nicht plötzlich stark verändert, gewinnt man ein hinreichend vollständiges Bild des Gefäßbaums.

Neue Entwicklungen, die schon marktreif sind, betreffen die Navigation des Führungskatheters sowie Operationen in anderen Bereichen wie an den Halsschlagadern oder den Becken-Bein-Gefäßen. Auch spezielle Zusatzinstrumente wurden schon simuliert, darunter so genannte *cutting-balloons*, die stark verkalkte Bereiche aufbrechen, oder auch IVUS-Systeme *(intravascular ultrasound)*, bei denen per Ultraschall im Katheter ein lokales Bild der untersuchten Gefäße aufgenommen werden kann. In diesem Jahr soll eine Erweiterung für die Kinderkardiologie (gerade hier gibt es wenig Möglichkeiten zum Trainieren) und für Verschlüsse in der Herzscheidewand auf den Markt kommen.

Mit minimalinvasiven Instrumenten kann man in den Glaskörper des menschlichen Auges eindringen, ohne die Linse zu verletzen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM

EyeSi: Eingriffe an der Augenlinse und der Netzhaut üben

Operationen am Auge (Bild unten) erfordern ebenfalls sehr große Fertigkeiten. Eine besondere Schwierigkeit liegt darin, dass der Arzt die Bewegung seiner Finger, mit denen er die Instrumente führt, mit den im Operationsmikroskop stark vergrößerten Bildern der Instrumente koordinieren muss.

Zu den bekanntesten Operationen zählt das Ersetzen einer Augenlinse, die durch den grauen Star trüb geworden ist. Dazu muss das vordere Auge geöffnet und die Linse so weit zerkleinert werden, dass die Teile entfernt werden können. Anschließend wird eine künstliche Linse eingesetzt.

Seltener, aber auch wesentlich schwieriger sind Operationen hinter der Linse. Wenn sich infolge einer Erkrankung der Glaskörper des Auges trübt, kann man ihn durch ein Öl mit ungefähr dem gleichen Brechungsindex ersetzen, sodass die Abbildungseigenschaften des Auges unverändert bleiben. Bei dieser Operation führt der Augenchirurg zwei Instrumente, die wie Nadeln aussehen, neben der Linse in das Auge ein. Eines davon ist eine Lichtquelle, das andere ein Vitrektor, eine Art Mikrostaubsauger, der durch eine Öffnung am Ende der Nadel Teile des Glaskörpers einsaugt und nach außen spült. Die beiden Instrumente dürfen dabei die Netzhaut (Retina), den »Lichtsensor« des Auges, nicht berühren, weil dies zur Erblindung führen kann.

Noch schwieriger sind Operationen direkt an der Netzhaut. Infolge einer diabetischen Erkrankung kann sich unmittelbar vor der Netzhaut eine Membran bilden, welche die Sehfähigkeit des Patienten reduziert. Mit einer extrem feinen Pinzette kann der Arzt eine solche Membran von der Netzhaut lösen, aus dem Auge entfernen und damit die Sehkraft wiederherstellen.

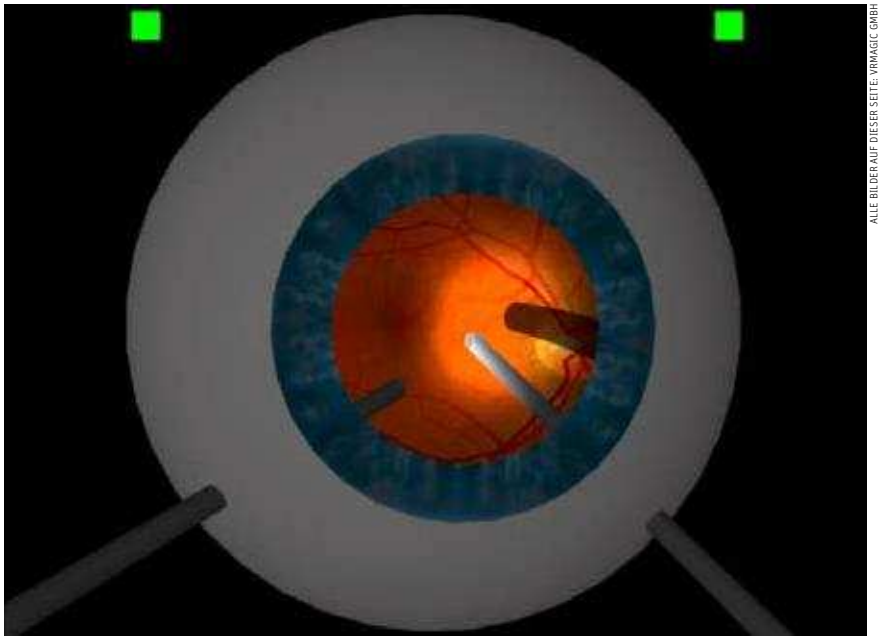
Wenn die Netzhaut im Bereich des schärfsten Sehens (der Makula) degeneriert ist, aber in anderen Bereichen, wo es eigentlich nicht so dringend notwendig wäre, besser erhaltene Netzhaut vorhanden ist, kann der Chirurg das »schlechte« Netzhautstück mit einem »guten« vertauschen. Dazu spritzt er Flüssigkeit zwischen die Netzhaut und das darunterliegende Gewebe, sodass sie sich löst und an die neue Stelle bewegt werden kann.

Markus Schill und Clemens Wagner haben als Trainingsstation für derartige Eingriffe das System EyeSi entwickelt und darüber am ICM promoviert. Inzwischen arbeiten beide bei der Firma VRmagic in Mannheim, einer Ausgründung des ICM, an der Weiterentwicklung und Vermarktung des Systems. Bereits heute hat das Training an diesem System das »wet lab« mit den Schweineaugen weit gehend verdrängt.

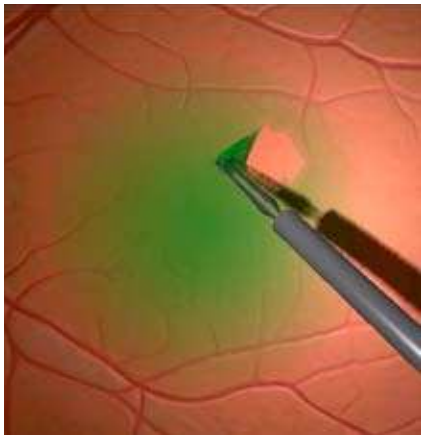
Der lernende Chirurg führt originalgetreue Instrumente in die mechanische Nachbildung eines Auges ein und blickt in ein Sichtsystem, das einem Stereomikroskop nachempfunden ist. Durch Okulare mit verstellbarem Augenabstand und Dioptrienkorrektur betrachtet er zwei daumennagelgroße, hochauflösende Mikrodisplays, in die das System die beiden Komponenten eines Stereobildpaares einspielt. Wie bei einem echten Stereomikroskop kann der Benutzer zwischen verschiedenen Linsensystemen wählen. Die (geringe) Tiefenschärfe sowie Licht- und Schatteneffekte werden ebenfalls realistisch nachgebildet.

Um die Fünfzigstelsekunde Zeitverzug zwischen Aktion des Benutzers und Reaktion des Systems einzuhalten, muss jeder Teil dieser Reaktion auf Geschwindigkeit optimiert werden. Hochauflösende Kameras verfolgen die Bewegungen der Instrumente und des mechanischen Auges mit einer Genauigkeit von weniger als einem Millimeter. Ein PC-Programm, das auf den Kamerabildern die farbigen Markierungen auf den Objekten findet und daraus deren Positionen im Raum berechnet, wäre jedoch zu langsam. Wir haben diese Aufgabe einem eigens konfigurierten Mikrochip (einem FPGA, siehe Spektrum der Wissenschaft 8/1997, S. 44) übertragen.

Als Nächstes muss das System feststellen, ob zum Beispiel ein Instrument die Netzhaut berührt. Im Prinzip könnte jede Stelle eines Instruments jede Stelle des Auges oder auch eines anderen Instruments berühren. Diese Fälle alle einzeln durchzuprüfen wäre viel zu zeitaufwändig. Stattdessen verwenden wir hierarchische Methoden: Wir teilen das Operationsgebiet zunächst grob in Teil-



ALLE BILDER AUF DIESER SEITE: VRMAGIC GMBH



Das Trainingssystem EyeSi (links): In der austauschbaren Gesichtsmaske auf dem höhenverstellbaren Tisch befindet sich ein mechanisches Auge, wahlweise mit Zugängen für Eingriffe am Glaskörper oder Katarakt-Operationen. Im simulierten Operationsmikroskop (oben) ist ebenso wie im echten nur der von der Lichtquelle ausgeleuchtete Bereich gut zu erkennen. Die grün eingefärbte Membran vor der Netzhaut (rechts) reißt ab, wenn man sie mit der simulierten Pinzette ungeschickt greift.

gebiete auf und verfeinern diese Aufteilung nur dort, wo sich Gegenstände nahekommen (Kasten S. 45).

Findet eine Berührung statt, muss die daraus folgende Deformation – zum Beispiel die Eindellung der Netzhaut durch ein Instrument – berechnet werden. Die Gewebesimulation in EyeSi basiert auf einem modifizierten Feder-Masse-Modell (Kasten S. 48). So wird eine Membran als eine Menge von Massepunkten dargestellt, die mit Federn verbunden sind. Wird ein Massepunkt verschoben, so übt er über die an ihm hängenden Federn Kräfte auf seine Nachbarn aus. Daraufhin bewegen sich diese Punkte, ziehen über ihre Federn an ihren Nachbarpunkten und so weiter, sodass sich die ursprüngliche Verschiebung über eine gewisse Strecke ausbreitet. Diese genäherte Lösung der Bewegungsgleichungen kann ausreichend schnell berechnet werden.

Aus der veränderten Geometrie sind nun die Bilder zu berechnen, die das linke und das rechte Auge im Stereomikroskop sehen würden. Diese Aufgabe übernimmt eine moderne Grafikkarte. Da sich der Chirurg während der Operation vollständig auf visuelle Information verlassen muss, haben wir auf eine realistische Visualisierung des Operationsfelds einschließlich Beleuchtungssituation und Schattenbildung besonderen Wert gelegt.

Während der »Schüler« in der virtuellen Welt arbeitet, bestimmt der »Lehrer« über einen berührungsempfindlichen Bildschirm (Touchscreen), welchen Fall der Schüler bearbeiten soll und welche Eigenschaften die Instrumente und Pedale des Geräts haben sollen. Um der Situation im Operationssaal möglichst nahezukommen, haben wir die Benutzeroberflächen gebräuchlicher Vitrektomie- und Phako-Maschinen (Glaskörper- und Linsenextraktionsmaschinen) getreulich nachgebildet. Über den Touchscreen kann man auch aufgezeichnete Trainingssitzungen wiedergeben und Theoriekurse ablaufen lassen.

EndoSim: Navigieren durch die Schlingen des Darms

Für die Diagnose und die Therapie von Erkrankungen innerhalb des Verdauungstrakts setzt man heute flexible Endoskope ein. Das sind schlauchartige Geräte, die in den Mund (Gastroskopie) oder den After (Koloskopie) eingeführt werden. Mit Stellrädern am hinteren Ende kann der Arzt über eine Seilzugmechanik das Vorderende biegen und damit sowohl in die gewünschte Richtung lenken als auch den Blick gezielt auf bestimmte Stellen des Darms richten. Einblick in das Innere des Patienten bekommt man in älteren Geräten durch Glasfasern, neuerdings durch eine Miniaturkamera an der Spitze des Geräts, die ihre Bilder elektronisch auf einen Monitor überträgt.

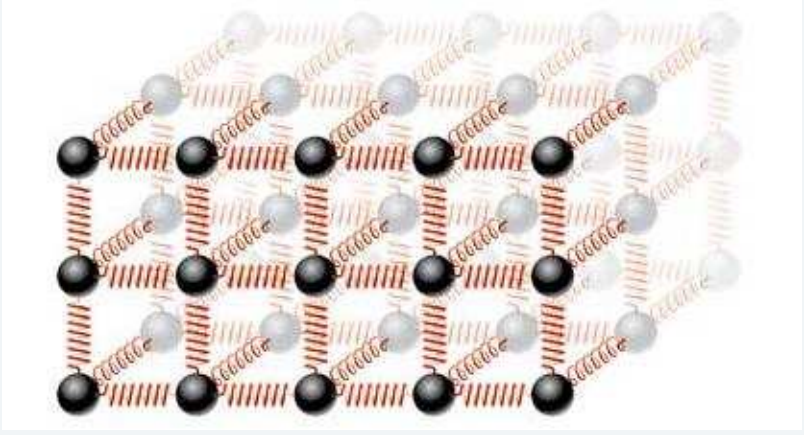
Bei einer Koloskopie muss der Arzt das Endoskop durch den gesamten Dickdarm mitsamt allen Windungen und Kurven navigieren, um ihn zum Beispiel auf Polypen überprüfen zu können. Die Spitze des Geräts muss er daher möglichst in der Mitte des Darms halten, insbesondere in Kurven.

Dabei ist trotz sorgfältiger Entleerung des Darms vor der Operation das ▷

Gewebesimulation

Im Prinzip besteht das Körpergewebe des Menschen wie jede Materie aus trägen Massen, die mehr oder weniger elastisch miteinander verbunden sind und deren Bewegungen durch Reibungseffekte gedämpft sind. Für die physikalische Modellierung pflegt man die drei Effekte Trägheit, Elastizität und Reibung zu trennen. Ein Stück Gewebe wird dann durch eine Ansammlung von Massepunkten wiedergegeben, die durch gedämpfte Federn miteinander verbunden sind. Das ergibt für jeden Massepunkt eine Kräftegleichung und daraus mit dem Gesetz »Kraft ist Masse mal Beschleunigung« eine (gewöhnliche) Differenzialgleichung, welche die Bewegung des Massepunkts beschreibt. Die Lösung dieses gekoppelten Systems von Differenzialgleichungen besteht darin, aus den gegenwärtigen Positionen der Massepunkte deren Positionen eine kurze Zeit später zu bestimmen. Wenn dieses Zeitintervall nicht zu lang ist und man gewisse Kompromisse bei der Genauigkeit eingeht, ist eine näherungsweise Lösung sehr schnell zu berechnen.

Im Prinzip könnte man dieses Modell mitsamt allen Konstanten – Massen, Federkonstanten, Reibungskoeffizienten – aus den physikalischen Eigenschaften des Materials herleiten. Die so gewonnenen Modelle sind jedoch in der Regel zu kompliziert, als dass ein Computer sie in der verfügbaren Zeit durchrechnen könnte. Stattdessen wählt man ein möglichst einfaches Modell und modifiziert dessen Parameter so lange, bis das Verhalten des Modellsystems dem Vorbild hinreichend nahekommt. Solche deskriptiven Modelle werden fast durchgehend in medizinischen Simulatoren eingesetzt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

▷ Kamerabild für eine Orientierung oft nicht ausreichend. Daher navigiert der Arzt sowohl nach Sicht als auch nach Gefühl: Wenn der Endoskopschlauch an die Darmwand stößt, sieht er das nicht unbedingt auf dem Monitor, sondern spürt es an dem verstärkten Widerstand, den das Gerät beim Weiterschieben erfährt. Je nach Lage des Schlauchs ergeben sich elastische oder Reibungskräfte, die zu unerwarteten Effekten führen können: Ist das Koloskop, dem (durch den Eingriff verformten) Darm folgend, am Vorderende zu einer Schlinge gekrümmt, und man lässt es los, streckt es sich mitunter derart, dass es ein Stück weit aus dem Körper wieder herausgeschoben wird. Die Verspannung des Geräts macht sich auch dadurch bemerkbar, dass sich die Navigationsräder immer schwerer drehen lassen – auch ein Hinweis darauf, dass die Situation verbessert werden müsste.

Während der Arzt bei der Herzkatheter- und der Augenoperation kaum Kräfte wahrnimmt, liefern diese ihm bei der Endoskopie entscheidende Hinweise auf die Operationssituation. Bei dem Trainingsgerät EndoSim, das zum Erlernen der Navigation bei einer Endoskopie sowie kleinerer Eingriffe dient, haben wir deswegen besonderen Wert auf eine realistische Kraftrückkopplung *(force feedback)* gelegt. Wesentliche Entwicklungsarbeiten an EndoSim hat Olaf Körner in seiner Dissertation am ICM geleistet; die Fortführung dieses Projekts liegt in den Händen unseres Doktoranden Klaus Rieger.

Statt in den Darm eines echten Patienten führt der Schüler das – modifizierte – Endoskop in ein mechanisches Gerät ein (Kasten rechts). Ein Computer berechnet das Bild, das die Kamera in der Spitze des Endoskops aufnehmen würde, und zeigt es auf einem Monitor an. Zugleich berechnet er die Kräfte, die auf das Gerät wirken würden, und realisiert sie mit Hilfe so genannter Force-Feedback-Geräte. Bei EndoSim geschieht das mit je einem Motor pro Freiheitsgrad des Endoskops.

Für die Kraftberechnung verwenden wir ein deskriptives Modell. Dabei unterscheiden wir vier verschiedene Arten von Interaktion zwischen Endoskopspitze und Darm (Bild S. 50 oben). Für die Feinanpassung unseres Modells haben wir die Parameter so lange variiert, bis sich der nachgemachte Darm für erfahrene Ärzte, die wir um Rat fragten, so anfühlte wie ein echter. Das geometrische Modell des Darms wurde aus einem Visible-Human-Datensatz gewonnen (Bild S. 50 unten), den die Arbeitsgruppe von Karl Heinz Höhne am Universitätsklinikum Eppendorf in Hamburg entwickelt hat (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 9/2001, S. 46). Zusätzlich zur Kraftrückkopplung kann sich der Arzt auch akustisch darauf hinweisen lassen, wenn er das Endoskop in eine schmerzhafte Lage gebracht hat: Der virtuelle Patient stöhnt.

Üben am individuellen Modell

Eine Neuentwicklung gibt dem Übenden darüber hinaus Hinweise, wie er aus einer verfahrenen Situation wieder herauskommt: Auf Wunsch weist ihm das System einen Weg aus der Verklemmung, den es aus den aktuellen Daten mittels heuristischer Verfahren berechnet.

Mit unseren Bemühungen um Operationstrainingssysteme sind wir nicht allein. Simulationssysteme werden entwickelt

- für die Zahn-, Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie in der oben genannten Arbeitsgruppe von Karl Heinz Höhne;
- für Bauchoperationen und gynäkologische Eingriffe von Uwe Kühnapfel und seinen Mitarbeitern am Forschungszentrum Karlsruhe;
- für Untersuchungen am Kniegelenk von Robert Riener und Mitarbeitern an der Technischen Universität München;
- für Ultraschallaufnahmen, die endoskopische Untersuchung von Gelenken, die Untersuchung des Naseninneren sowie gynäkologische oder den Magen be- ▷

Kraftrückkopplung

Ob es eine Kaffeetasse zu halten, eine Schraube festzuziehen, zwei kompliziert geformte Bauteile zusammenzusetzen oder einen flexiblen Schlauch schonend in den Darm eines Patienten einzuführen gilt: Für viele feinmotorische Tätigkeiten regeln wir unsere eigenen Bewegungen nahezu unbewusst in Abhängigkeit von dem Widerstand, den das Werkstück der Bewegung entgegensetzt. In dem Endoskopie-Simulator EndoSim muss diese Widerstandskraft stellvertretend für den echten Darm von Motoren aufgebracht werden, die auf das vom Benutzer gehaltene Instrument wirken.

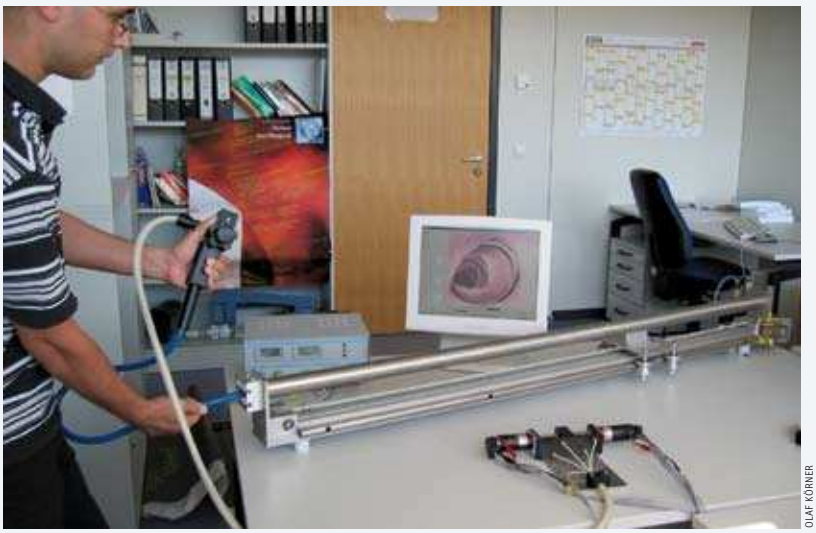
Bei einem echten Endoskop endet der Schlauch in einem Handgriff. Daran sind zwei Stellräder angebracht, mit denen der Benutzer die Spitze des Schlauchs in zwei zueinander senkrechten Richtungen verbiegen kann.

Im Simulator EndoSim läuft der Schlauch in einem Führungsrohr, das auf der Unterseite geschlitzt ist. Die Spitze des Schlauchs ist über ein Abschlussstück und eine Stange, die durch den Schlitz im Rohr läuft, mit einem Schlitten verbunden. Dieser wird auf einer Aluminiumschiene geführt und über einen Zahnriemen von einem Motor angetrieben. Der liefert die Widerstandskraft gegen Vorschieben und Zurückziehen des Schlauchs.

Das Abschlussstück ist so auf der Stange montiert, dass der Schlauch in sich drehbar bleibt. In seiner Verlängerung sitzt ein weiterer Motor, der so lang und dünn ist, dass er mitsamt dem Schlauch im Rohr vor- und zurückgleiten kann und zugleich genügend Kraft aufbringt, um dem Versuch des Benutzers, den Schlauch zu drehen, einen realistischen Widerstand entgegenzusetzen. Die Drehung selbst wird über einen so genannten Drehgeber (»Encoder«) am Ende des Motors gemessen.

Um den Arzt den Widerstand des Schlauchs gegen Verbiegungen der Spitze richtig spüren zu lassen, könnte man mit Stellmotoren die Spitze aktiv verbiegen. Die Motoren würden jedoch in dem engen Führungsrohr keinen Platz finden. Wollte man die Motoren nach außen verlagern und ihre Kraft, ähnlich wie die vom Arzt über die Handräder ausgeübte Kraft, über Seilzüge auf die Schlauchspitze wirken lassen, müssten die Motoren im Handgriff selbst sitzen, wo es immer noch zu eng ist: In zwei zueinander senkrechten Richtungen könnte man allenfalls kleine und zu schwache Motoren montieren.

Statt die Kraft auf den Umweg über die Seilzüge bis zur Spitze und zurück zu schicken, lassen wir sie unmittelbar auf die Stellräder wirken. Allerdings müssen die Motoren wegen ihrer Größe auch hier ausgelagert werden. Es trifft sich gut, dass an einem echten Endoskop außer dem Untersuchungsschlauch ein Versorgungsschlauch angeschlossen ist, der unter anderem das Gerät mit Strom versorgt und über den Flüssigkeit in den Darm eingespült und aus ihm abgesaugt werden kann. Durch diesen Schlauch lassen wir Seilzüge laufen. Im Endoskophandgriff endet jeder Seilzug in einem unelastischen Teflonfaden, der auf die Achse des Stellrads aufgewickelt ist. Am anderen Ende läuft ein ähnlicher Teflonfaden um die Achse des antreibenden Motors.



OLAF KÖRNER

Exakt formuliert!

Langenscheidt Scientific English
Für Mediziner
und Naturwissenschaftler

1. Auflage 2006
152 Seiten, Paperback
ISBN 978-3-86117-257-4
€ 24,90 [D] · € 25,60 [A] · sFr 42,70

Wortschatz und Formulierungshilfe für wissenschaftliche Publikationen und Vorträge

Optimal vorbereitet mit authentischen Beispielsätzen für Präsentationen, Diskussionen, Fachartikel und Manuskripte

Sprachlich perfekt in britischem und amerikanischem Englisch

So bekommen Ihre wissenschaftlichen Inhalte das sprachliche Niveau, das sie verdienen!

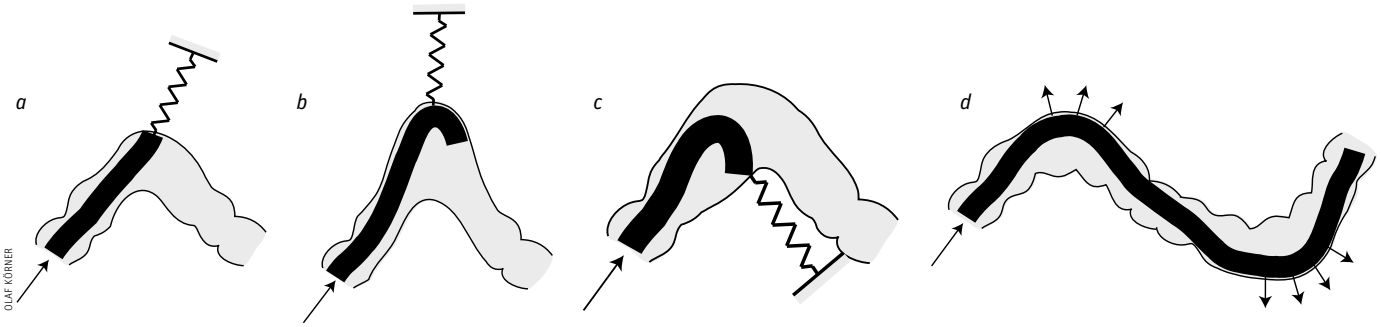
Umfangreicher Anhang mit Vorschlägen für die Manuskripteinreichung bei britischen und amerikanischen Fachzeitschriften.

Infos & mehr

www.langenscheidt.de/fachverlag

Langenscheidt Fachverlag GmbH
Postfach 40 11 20 · 80711 München
fachverlag@langenscheidt.de

Langenscheidt
Fachverlag



OLAF KÖRNER

So können Endoskop und Darm Kräfte aufeinander ausüben: *(a)* frontale Kollision der Spitze, *(b)* Verformung des Darms, *(c)* seitliche Kollision der Spitze, *(d)* Reibung am Schlauch.

▷ treffende Kathetereingriffe am Fraunhofer-Institut für grafische Datenverarbeitung in Darmstadt unter maßgeblicher Beteiligung von Georgios Sakas (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 103 und 5/2001, S. 115);

▶ für Katarakt-Operationen am Karolinska-Institut in Stockholm.

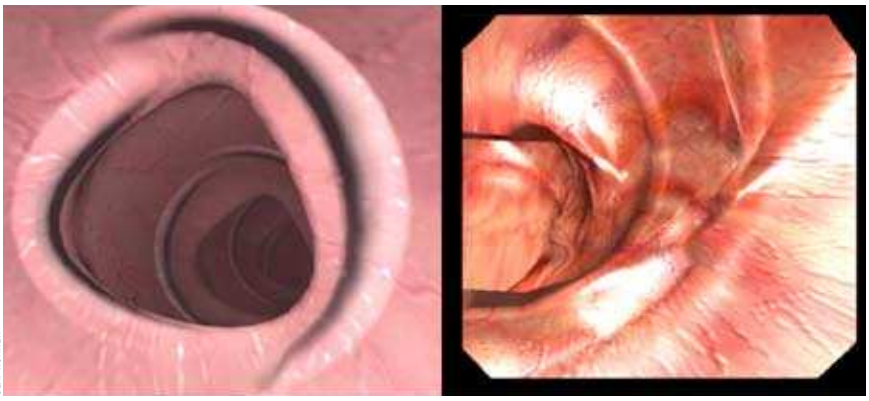
Die Firmen METI *(Medical Education Technologies)* in Sarasota (Florida), Symbionix in Tel Aviv und Immersion Medical in Gaithersburg (Maryland) bieten jeweils ein größeres Sortiment an medizinischen Simulationssystemen.

Für die Zukunft ist zu erwarten, dass sich Trainingssysteme immer weiter durchsetzen werden. Bereits die heutigen Systeme basieren großenteils auf Softwarekomponenten, die sich leicht auf andere Operationen übertragen lassen. Beispiele sind die Gewebesimulation, die je nach Wahl der Parameter für die unterschiedlichsten Gewebe eingesetzt werden kann, und die Kollisionserkennung, die bei jeder Art simulierter Operation benötigt wird.

Trainingssysteme für neuartige Operationen sind immer dann relativ leicht zu entwickeln, wenn der zu simulierende Bereich klein ist, also bei minimalinvasiven Operationen. Hauptschwierigkeit dabei ist die Programmierung der »Inhalte«, die dem Arzt vorgespiegelt werden. Solche Inhalte wären im Prinzip direkt aus Patientendaten, wie sie oft vor einer Operation mit Magnetresonanz- oder Computertomografen aufgenommen werden, zu gewinnen. Dann wäre es möglich, eine Operation nicht an irgendeinem Modell, sondern an dem virtuellen Körper eines konkreten Patienten durchzuspielen, bevor die reale Operation stattfindet. Dies könnte bei besonders komplizierten Fällen das Risiko für den Patienten vermindern.

Da die Trainingssysteme immer realistischere Simulationen erlauben und die Effektivität der Systeme immer besser belegt ist, scheint die Zeit dafür gekommen zu sein, dass sie fester Bestandteil der Medizinerausbildung werden. Entsprechende Schulungen könnten dabei an Simulationszentren durchgeführt werden, wie sie bereits an verschiedenen Orten, zum Beispiel in Mainz, existieren. ◁

Aus den Daten des Projekts »Visible Human«, die von der Arbeitsgruppe um Karl Heinz Höhne aufbereitet wurden, erzeugt das System EndoSim ein Bild, das ein Endoskop in einem echten Darm aufnehmen würde.



OLAF KÖRNER

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Daniel Gembris (oben) promovierte 2001 in Physik an der Universität Dortmund. Er ist Leiter der Arbeitsgruppe Magnetresonanz-Technologie am Institut für Computerunterstützte Medizin (ICM) in Mannheim. **Jürgen Hesser** (Mitte) promovierte 1992 in Heidelberg über genetische Algorithmen und habilitierte sich 1998 mit dem Thema Virtuelle Realität in der Medizin an der Universität Mannheim. Er leitet die Arbeitsgruppe Bildanalyse und Grafik am ICM. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Echtzeit-Bildanalyse, inverse Probleme, Computergrafik sowie Bioinformatik. Aus seiner Arbeitsgruppe gingen die drei Firmen Volume Graphics GmbH, Cathi GmbH und UltraOsteon GmbH hervor. **Reinhard Männer** promovierte 1979 in Heidelberg in Physik und habilitierte sich dort 1986. Er ist Inhaber eines Unesco-Lehrstuhls für Technische Informatik an der Universität Mannheim sowie Leiter des ICM. Seine Forschungsinteresseren beziehen sich unter anderem auf anwendungsspezifische Rechensysteme in Physik und Medizin. Männer ist Mitgründer von acht Spin-Off-Firmen.

Implementation of a haptic interface for a virtual reality simulator for flexible endoscopy. Von Olaf Körner und Reinhard Männer in: Proceedings of the 11th symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems. Von Blake Hannaford und Hong Tan (Hg). IEEE Computer Society Press, Los Angeles 2003, S. 278

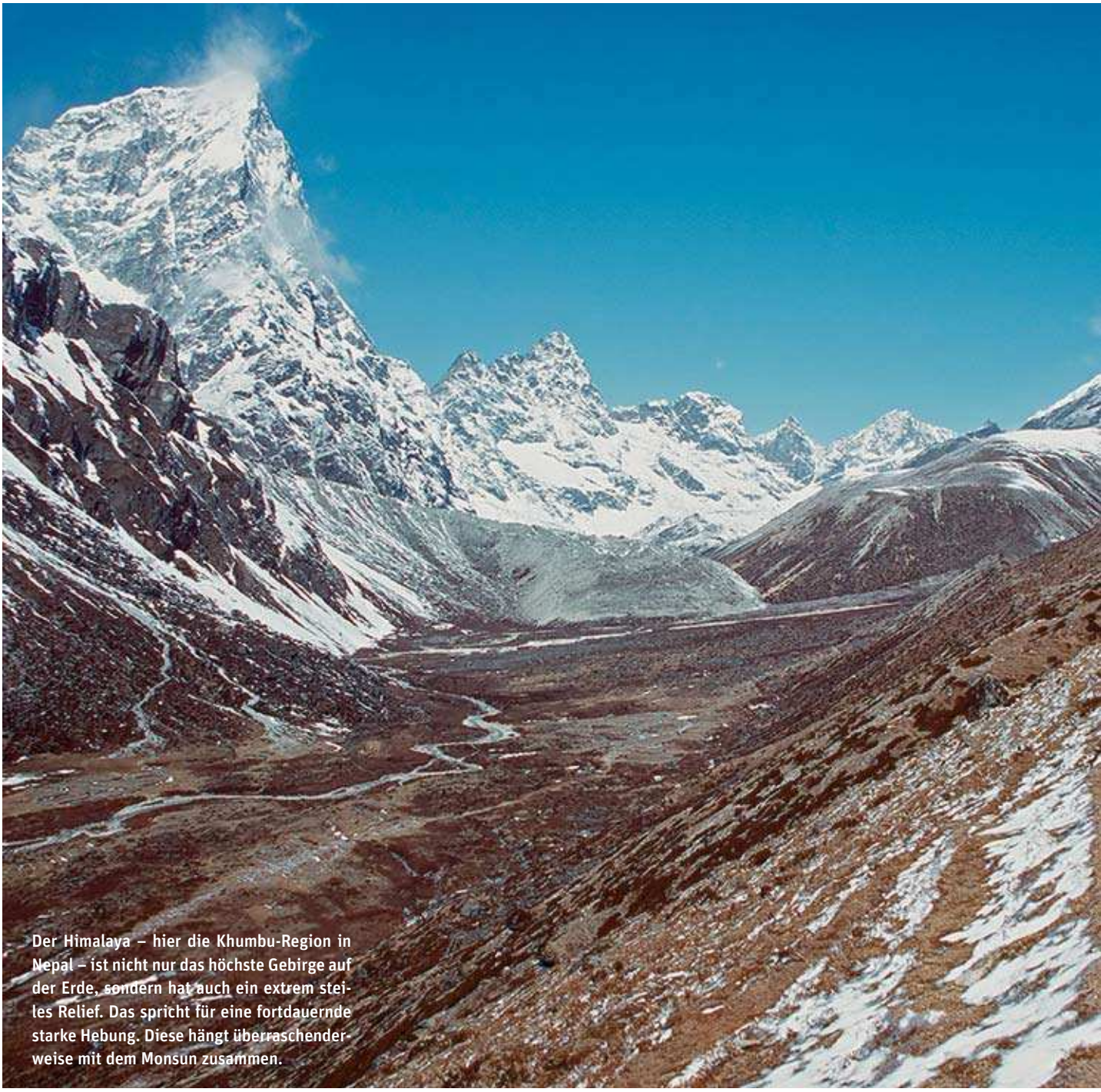
Collision detection and tissue modeling in a VR simulator for eye surgery. Von C. Wagner, M. A. Schill und R. Männer in: 8th Eurographics Workshop on Virtual Environments. Von S. Müller und W. Stürzlinger (Hg.). Eurographics Association, Aire-La Ville (Schweiz) 2002, S. 27

Intraocular surgery on a virtual eye. Von Clemens Wagner, Markus A. Schill und Reinhard Männer in: Communications of the ACM, Bd. 45, Heft 7, S. 45, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/861879.

Wie das Klima Berge versetzt

Neuere Untersuchungen im Himalaya und im Hochland von Tibet belegen einen Zusammenhang zwischen den lokalen Wetterverhältnissen und der Auffaltung von Gebirgsketten.



Der Himalaya – hier die Khumbu-Region in Nepal – ist nicht nur das höchste Gebirge auf der Erde, sondern hat auch ein extrem steiles Relief. Das spricht für eine fortdauernde starke Hebung. Diese hängt überraschenderweise mit dem Monsun zusammen.

STEFFEN FOERSTER / WORLDOFSTOCK.COM

Von Kip V. Hodges

Vor sechs Jahren lernte ich eine wichtige Lektion über Berge und Wetter – von einem Pferd. Zu jener Zeit führte ich geologische Untersuchungen im ehemals selbstständigen Königreich Mustang durch, das heute zu Nepal gehört. Es liegt am Oberlauf des Flusses Kali Gandaki, der vom tibetischen Hochland aus nach Südwesten zieht und dabei in einer spektakulären, tief eingeschnittenen Schlucht zwischen den Achttausendern Annapurna I und Dhaulagiri den Himalaya-Hauptkamm durchbricht. Der Bauer, von dem ich das Pferd hatte, sagte mir, Ausritte auf der Hochebene könne ich damit zu jeder Tageszeit unternehmen, aber für Abstiege ins Tal sei das Tier nur am frühen Morgen zu gebrauchen.

Da mir die Bemerkung seltsam vorkam, beachtete ich sie nicht weiter und begann meinen geplanten Abstecher in die Schlucht, obwohl es schon relativ spät war. Erstaunt registrierte ich, wie am frühen Nachmittag an einer engen Stelle wie aus dem Nichts heftiger Wind einsetzte. Während er sich verstärkte, wurde das Pferd immer langsamer, bis es schließlich anhielt, die Mähne schüttelte und kehrtmachte. So sehr ich mich auch mühte, konnte ich den Gaul im Sattel sitzend nicht dazu bewegen, sich wieder in den Wind zu drehen. Als ich abstieg und das Tier am Zügel ins Tal hinabzerrte, kam mir der Verdacht, dass es mehr über das Wetter im Himalaya wusste als ich.

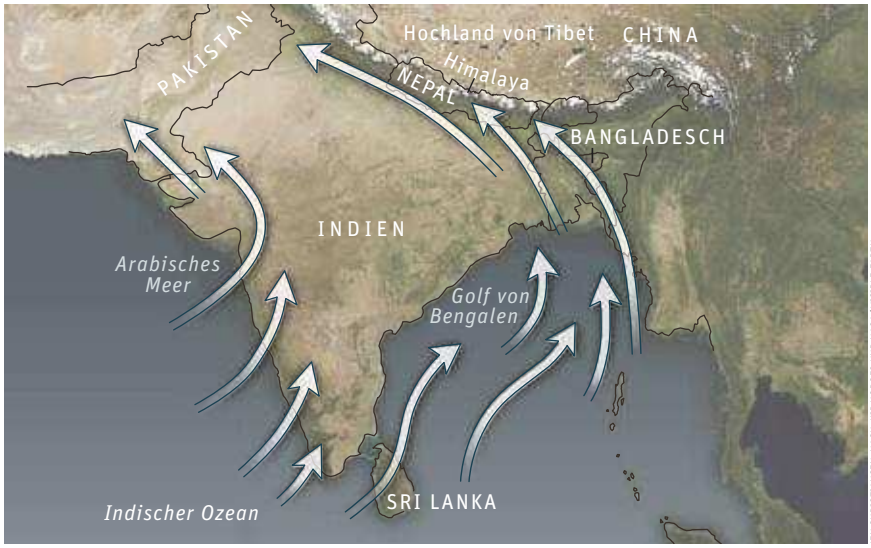
Tatsächlich fegt die steife Brise, wie ich bald herausfand, fast täglich durch die Schlucht des Kali Gandaki. Dabei erreicht sie regelmäßig eine ziemlich konstante Geschwindigkeit von siebzig Kilometern pro Stunde und ist damit einer der stärksten Hangaufwinde der Erde. Der Grund lässt sich leicht nennen: Die Luft im Tal erhitzt sich nach Sonnenaufgang und strömt im weiteren Tagesverlauf nach oben. Das Phänomen zählt zu den vielen Beispielen dafür, wie große Reliefunterschiede das Klima beeinflussen.

Umgekehrt wirkt sich das Klima aber auch auf die Gestalt der Erdoberfläche aus. Wie seit Langem bekannt ist, agieren Wind, Kälte, Hitze, Regen und Eis wie Bildhauer, die das Gesicht einer Landschaft prägen. Doch nach neuesten Untersuchungen reicht ihr Einfluss noch viel weiter. Demnach besteht eine im wahrsten Sinn des Wortes tiefe Verbindung zwischen Klima und Gebirgsbildung.

Machenschaften des Monsuns

Besonders deutlich zeigt sich das am engen Zusammenhang zwischen der bis heute andauernden Auffaltung des Himalaya und einem der dramatischsten Wetterphänomene der Erde: dem alljährlichen Monsun in Indien. Er entsteht dadurch, dass sich im Frühjahr die Luft über dem Subkontinent viel rascher erwärmt als über dem Indischen Ozean. Die Folge ist ein Südwestwind, der Feuchtigkeit ins Landesinnere transportiert. In der Nähe Sri Lankas gabelt sich der Luftstrom. Ein Ast dreht nach Norden und lenkt die feuchten Luftmassen über den Süden und Westen Indiens hinweg nach Pakistan. Der andere Ast behält die ursprüngliche Strömungsrichtung bei und biegt erst über Bengalen und Bangladesch nach Nordwesten ab (Bild auf S. 54).

Die von ihm mitgeführten Luftmassen nehmen zusätzliche Feuchtigkeit aus dem Golf von Bengalen auf. Das begünstigt die Bildung einer Serie tropischer Tiefs vor der Nordostküste des indischen Subkontinents. Gleichzeitig entwickelt sich ein Tiefdrucktrog entlang der Südflanke des Himalaya in Nordindien. Er saugt die Luftmassen aus dem ▷



JEN CHRISTIANSEN, NACH: KIP HODGES UND NASA/VISIBLE EARTH

Feuchte Luft strömt im Sommer mit dem Monsun vom Indischen Ozean auf den Subkontinent (weiße Pfeile). Ein Teil zieht über den Golf von Bengalen und nimmt dabei weitere Feuchtigkeit auf. Auf dem Weg nach Norden stoßen diese wassergesättigten Luftmassen schließlich an den Himalaya, der zu hoch ist, als dass sie ihn überwinden könnten. Stattdessen regnen sie an seiner Südflanke aus. Dabei fällt stellenweise in wenigen Monaten mehr Niederschlag als in einem ganzen Jahr im Amazonas-Regenwald.

Golf von Bengalen an, sodass sie Richtung Nordwesten über Bangladesch und Nepal hinweg nach Kaschmir strömen.

Unterwegs treffen die Luftmassen auf den Himalaya. Unablässig steigt dort in Konvektionszellen feuchtigkeitsgesättigte Luft auf – ähnlich dem Blubbern heißer Suppe in einem Kochtopf – und versucht vergeblich über den Gebirgskamm hinwegzugelangen. Dabei kühlt sie sich ab, sodass der enthaltene Wasserdampf kondensiert. Infolgedessen kommt es zu wolkenbruchartigen Regenfällen.

Laut Aufzeichnungen der Wetterstationen im Himalaya fallen dort in der Regel mehrere Meter Niederschlag pro Monsun-Saison – mehr als die jährliche Gesamtmenge im Regenwald des Amazonasbeckens. Betroffen ist vor allem das Vorgebirge in Höhen zwischen 1000 und 3500 Metern. Nur wenig feuchte Luft schafft es über den Himalaya-Hauptkamm hinweg bis Tibet, was zu extremen Klimagegensätzen führt. In einigen Gebieten kann ein Reisender innerhalb von 200 Kilometern von tropischem Regenwald durch zerklüftete Hochgebirgslandschaft in ein wüstenhaftes Hochplateau gelangen.

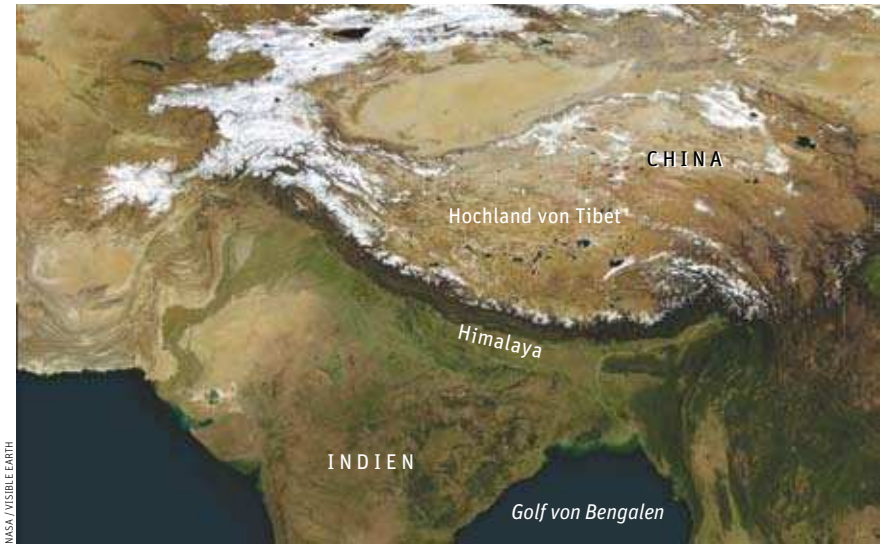
Offensichtlich übt der Himalaya als »Regenschirm« Tibets einen starken Einfluss auf das regionale Klima aus. Doch wie sich herausstellt, gilt auch das Umgekehrte: Die extreme Erosion durch die gewaltigen Monsunregenfälle hat Auswirkungen auf die Vorgänge tief unter der Erdoberfläche. Wie ist das möglich? Die Antwort liefern neue Erkenntnisse über die Wechselwirkung von Bergketten mit ihrer Umgebung. Sie sind das Resultat umfangreicher Forschungen über die verschiedenen geologischen Kräfte, die zur Bildung und stetigen Umformung von Gebirgen beitragen.

Nicht ohne Grund heißt die Himalaya-Tibet-Region auch »Dach der Welt«. In ihr liegen die hundert höchsten Erhebungen auf dem Festland. Nur acht Berge in den USA und Kanada übertreffen die durchschnittliche Höhe des tibetischen Hochplateaus, das etwa die gleiche Fläche wie die Iberische Halbinsel einnimmt. Geowissenschaftler sprechen von einem Orogen (nach griechisch *oros* = Berg und *genos* = Geburt), also einem Ort, an dem eine Gebirgsbildung stattfindet.

Die Theorie der Plattentektonik erklärt die Topografie der Region zum Teil. Alle großen Gebirgsketten der Erde liegen in Gegenden, wo zerbrochene Teile der festen äußeren Schale unseres Planeten – die Lithosphärenplatten – zusammenstoßen. Diese Kollision kann schon eine Weile zurückliegen oder heute noch stattfinden. Der Himalaya entstand, als die Indische Platte, die nach Abspaltung vom erdmittelalterlichen Superkontinent Gondwana Richtung Norden wanderte, vor etwa 45 Millionen Jahren die Eurasische Platte rammte. Schon ein Güterzug oder Öltanker benötigt etliche Minuten, um zum Stillstand zu kommen, nachdem die Bremsen betätigt wurden. Genauso wenig wurde die Indische Platte sofort gestoppt. Ihre Massenträgheit ist vielmehr so groß, dass sie sich sogar heute noch immer weiter in die Eurasische Platte bohrt – mit einer Geschwindigkeit von etwa vier Zentimetern pro Jahr.

In Kürze

- Nach neuesten Erkenntnissen kann das Klima nicht nur die Erdoberfläche formen, sondern auch die **geologische Aktivität in großen Tiefen** beeinflussen und so eine Rolle bei der Auffaltung von Gebirgen spielen.
- Ein Beispiel für die Beziehung zwischen Klima und Geologie ist ein **Rückkopplungsmechanismus** zwischen dem Himalaya und dem alljährlich wiederkehrenden indischen Monsun.
- Die **starken Niederschläge** erodieren die Südflanke der Bergkette. Damit schaffen sie ein Auslassventil für Krustenmaterial, das bei den hohen Temperaturen und dem enormen Druck tief unter Tibet eine zähplastische Konsistenz angenommen hat und wie Zahnpasta in der Tube an der Stelle geringsten Widerstands herausgepresst wird. Diese **langsame Extrusion** erneuert die Gebirgswand, sodass sie trotz stetiger Erosion ihre Höhe bewahrt und den Monsun weiter aufhält.
- Belege dafür sind eine **ungewöhnlich rasche Hebung** des Gebiets größten Niederschlags sowie sein sehr steiles Relief mit tief eingeschnittenen Flusstälern. Hohe Erosionsraten über Jahrmillionen hinweg, die durch Isotopenanalyse und Thermochronologie nachgewiesen wurden, untermauern dieses Hebungsszenario.



NASA / VISIBLE EARTH

Die Auswirkungen des Monsuns auf Indien und Tibet sind auf diesem Satellitenbild deutlich erkennbar. Südlich des Himalaya lassen wolkenbruchartige Niederschläge eine üppige Vegetation gedeihen, der das Gebiet den grünen Farbton verdankt. Nördlich der Gebirgsbarriere, die den Monsunregen abfängt, liegt das trockene Hochland von Tibet. Weiße Gebiete sind von Schnee bedeckt.

Dabei drückt sie wie ein Indenter – ein diamantener Stempel für die Härteprüfung von Werkstoffen – unablässig Material der eurasischen Lithosphäre zur Seite. Dadurch hat sie große Gesteinsblöcke, die durch gebogene Spannungsrisse – fachsprachlich: Verwerfungen – voneinander getrennt sind, Richtung Osten nach Indochina hin verschoben. Das konnten Paul Tapponnier und Peter Molnar am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge schon in den 1970er Jahren überzeugend darlegen.

Durch die Kollision zwischen den Platten wurde zudem die Erdkruste – die obere Schicht der Lithosphäre – verkürzt und verdickt. Auf einem Kontinent beträgt ihre Mächtigkeit durchschnittlich etwa dreißig Kilometer. In Gebirgsketten wird dieser Wert jedoch teils erheblich übertroffen. Das Himalaya-Tibet-Orogen weist die dickste Kruste der Erde auf – stellenweise erreicht sie eine Mächtigkeit von mehr als siebzig Kilometern.

Das erklärt auch, warum dort die höchsten Berge liegen. Nach dem Prinzip des Archimedes erfährt ein Objekt, das in eine Flüssigkeit getaucht wird, einen Auftrieb, der dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit entspricht. Genau wie ein dicker Eisberg weiter aus dem Meerwasser herausragt als ein dünner, weil er mehr davon verdrängt, »schwimmt« eine Region mit ungewöhnlich dicker Kruste – wie das Himalaya-Tibet-Orogen – höher im darunterliegenden, zähflüssigen Mantel auf als angrenzende Bereiche mit dünnerer Kruste.

Der Zusammenstoß von Lithosphärenplatten bildet so die Basis für die Entstehung von Gebirgsketten. Doch auch andere Prozesse wie der Transfer von Energie haben über längere Zeiträume hinweg Auswirkungen auf die Orogenese. Die große Erkenntnis – und Überraschung – der letzten Jahre ist, dass Starkregenfälle, die auftreten, weil die Berge feuchte Luftmassen blockieren, ihrerseits den Energiefluss tief unter der Erdoberfläche modifizieren können.

Gestein, das wie Zahnpasta fließt

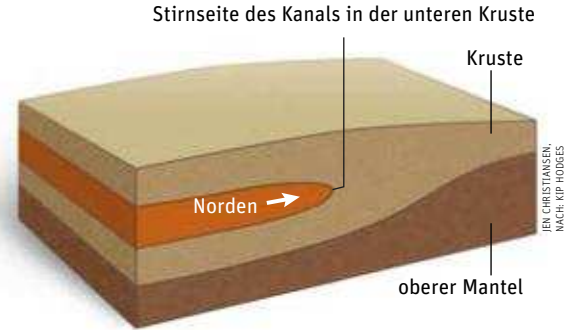
Physikalisch betrachtet ist ein Gebirgssystem ein Energiespeicher ähnlich einem Stausee hinter einem Wasserkraftwerk. Indem der Staudamm den Fluss aufhält, wandelt er kinetische Energie in potenzielle Gravitationsenergie um, die proportional zur Höhendifferenz zwischen dem Wasserspiegel des künstlichen Sees und dem Talboden unterhalb der Staustufe ist. Wenn die Möglichkeit dazu bestünde, würde das zurückgehaltene Wasser, um ins Gleichgewicht mit seiner Umgebung zu kommen, die gespeicherte Energie schnell wieder abgeben, indem es abfließt. Allein der Damm verhindert das – sofern er nicht bricht.

In ähnlicher Weise hat das Himalaya-Tibet-Orogen eine natürliche Tendenz, wie ein Sandhaufen auseinanderzulaufen, um die potenzielle Energie loszuwerden, die in seiner ungewöhnlich dicken Kruste steckt. Diese Kruste ist zwar starr, aber durch Spannungsrisse in viele Blöcke zersplittert, die gegeneinander verrutschen können. Außerdem werden Schichten tief unter dem Gebirge durch dessen Auflast so zusammengequetscht, dass sie sich stark aufheizen. Dann beginnen sie wie Zahnpasta zu fließen, die in der Tube hin und her gedrückt wird.

Theoretischen Modellen und Feldbeobachtungen zufolge können solche Kanäle mit pastösem Gesteinsmaterial Jahrmillionen bestehen bleiben. Und wenn sie die Möglichkeit erhalten, ihre potenzielle Energie abzugeben, zerlaufen sie langsam. Nach jüngsten Untersuchungen durch meine Kollegen Marin Clark und Leigh Royden vom MIT dürfte der sanfte, gleichmäßige Abfall des tibetischen Hochplateaus nach Südosten hin daher rühren, dass zähplastisches Material in Tibets tiefer Kruste bis weit unter den östlichen Rand des Plateaus vorgedrungen ist (Bild unten auf S. 56).

Doch scheint sich die pastöse Gesteinsschicht auch nach Süden zum Himalaya-Hauptkamm hin zu bewegen. Das ergaben aufregende Befunde aus jüngster Zeit. Unter der Auflast des Gebirges nimmt das zähplastische Tiefengestein nämlich den Weg des geringsten Widerstands. Am wenigsten Widerstand aber bietet eine Region, in der die Kruste ständig durch Erosion abgehobelt wird – wie am Südhang des Himalaya.

Indem das pastöse Krustenmaterial dorthin ausweicht, wirkt es für die Bergkette wie der Achsnagel am Karren – jener Stift an der Außenseite der Nabe, der verhindert, dass sich das Rad von der Achse löst. Eigentlich müsste der Himalaya nämlich durch den Monsun von Süden her binnen Kurzem so weit abgetragen werden, dass die feuchten Luftmassen seinen Kamm überwinden und in das Hochland von Tibet vorstoßen können. Doch die fließende untere Kruste transportiert unablässig frisches Gesteinsmaterial zur Stirnseite des Gebirges und sorgt so für dessen fortwährende Erneuerung. ▷



JEN CHRISTIANSEN, NACH: KIP HODGES

Einige Geologen vermuten, dass tief unter Tibet zähplastisches Krustengestein zum Rand des Hochlands drängt. Dadurch wird das enorme Gravitationspotenzial abgebaut, das in dem Plateau steckt.

▷ Andererseits lässt die durch den Regen bedingte Erosion das pastöse Gesteinsmaterial in der Tiefe bevorzugt zur Stirnseite des Gebirges fließen. So schließt sich der Kreis: Das System Monsun/Gebirge jagt seinen eigenen Schwanz.

Dieses komplexe Bild der Orogenese in der Himalaya-Tibet-Region beruht auf der Analyse der hauptsächlichen Verwerfungen, die das Gebiet durchziehen. An solchen Rissen in der Lithosphäre können, wie gesagt, große Gesteinsblöcke aneinander vorbeigleiten. In Gebirgsregionen handelt es sich dabei meist um Auf- oder Überschiebungen, die typischerweise bei Plattenkollisionen auftreten.

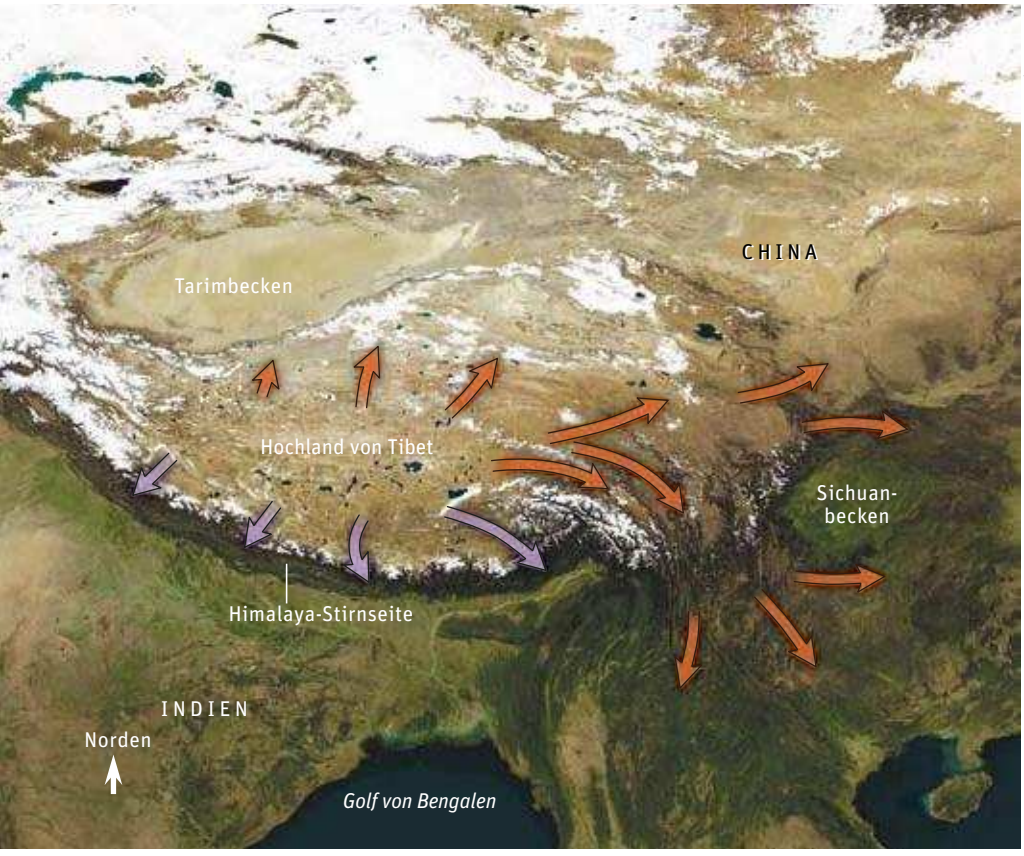
Wer je im Winter vor dem Haus Schnee geschippt hat, kennt das Phänomen. Die schindelartig zusammengeschobenen Schichten von verharschtem Schnee, die sich vor der Schaufel aufbauen, sind durch Brüche getrennt, die den Überschiebungen entsprechen.

Ein ähnliches Bild bieten vertikale Schnitte in Nord-Süd-Richtung durch den Himalaya. Es ist geprägt durch drei große Verwerfungen: die Hauptzentral-, Hauptrand- und Hauptfrontal-Überschiebung. Alle drei reichen bis weit in die Tiefe und vereinigen sich dort zur Himalaya-Sohl-Überschiebung. Gestein oberhalb jeder einzelnen solchen Verwerfung bewegt sich jeweils relativ zu dem darunter schräg aufwärts nach Süden.

Vor rund zwanzig Jahren identifizierte jedoch ein Forscherteam am MIT, dem ich angehörte, gemeinsam mit Wissenschaftlern anderer Institutionen einen zweiten Typus von Scherflächen im Himalaya. Diese Art von Verwerfungen schien ganz und gar nicht ins Bild einer Gebirgsbildung durch Kollision zweier Kontinente zu passen – und sollte unsere Sicht dieses Vorgangs gründlich verändern.

Unmittelbar nördlich vom Himalaya-Hauptkamm erstreckt sich die Südtibet-Störung – ein System von Verwerfungen, die äußerlich den erwähnten Überschiebungen ähneln, aber die entgegengesetzte Scherrichtung aufweisen: Der obere Krustenblock wird nicht nach Süden in Richtung Himalaya hochgedrückt, sondern bewegt sich relativ zur darunterliegenden Gesteinsschicht nach Norden.

Solche Abscherungsflächen gehören statt zu Kompressions- zu Dehnungsstrukturen. Diese treten gewöhnlich in Zonen auf, wo die Kruste nicht zusammengepresst, sondern auseinandergerissen wird, sodass sie sich spreizt und ausdünnt. Beispiele dafür sind die mittelozeanischen Rücken, der Oberrheingraben in Süddeutschland oder die Basin and Range Province zwischen dem Colorado-Plateau und der Sierra Nevada in Nordamerika. Niemand hätte vor zwanzig Jahren solche Dehnungsstrukturen an Stellen vermutet, wo tektonische Platten frontal zusammenstoßen.



JEN CHRISTIANSEN, NACH: KIP HODGES UND NASA/VISIBLE EARTH

Pastöses Gesteinsmaterial, das in Tibets tiefem Untergrund zur Seite gedrängt wird, verdickt am Rand des Hochlands von unten her die Erdkruste (orangefarbene Pfeile). Am Himalaya, wo ergiebige Monsun-Niederschläge eine starke Erosion bewirken, dringt es dagegen bis zur Oberfläche vor (lila Pfeile).

Der Versuch, sie in die Gesamtdynamik des Himalaya-Tibet-Orogens einzuordnen, brachte meine Mitarbeiter und mich damals auf eine Idee. Könnte es sein, dass plastisch fließendes Krustenmaterial aus der Tiefe die erodierten Bereiche am Südabhang des Himalaya immer wieder auffüllt? Tatsächlich bewegt sich das Gestein zwischen der Hauptfrontal-Überschiebung und dem Südtibet-Störungssystem sowohl relativ zu den Schichten unterhalb der Himalaya-Sohl-Überschiebung als auch zu denen oberhalb der Südtibet-Verwerfung nach Süden. Hier haben wir somit einen Kanal, durch den zähplastisches Gestein unter Tibet wie Zahnpasta in südlicher Richtung herausgepresst werden könnte. Der stärkste Fluss sollte dabei zwischen der Hauptzentral-Überschiebung und der Südtibet-Störung auftreten.

Schon vor zwanzig Jahren gab es diverse Hinweise darauf, dass beide Verwerfungen zumindest während des Unteren Miozäns vor 22 bis 16 Millionen Jahren aktiv waren. Deshalb stellte ich Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahre zusammen mit Clark Burchfiel und Leigh Royden vom MIT ein einfaches Modell der Vorgänge in dieser erdgeschichtlichen Epoche auf, wonach sich durch simultane Verschiebungen an den zwei genannten Störungssystemen das Gestein dazwischen nach Süden bewegte. Die Triebkraft für den Vorgang sahen wir im Druckunterschied zwischen dem sich hebenden Tibet-Plateau und Indien.

Wie ausgepresstes Gestein die Landschaft formt

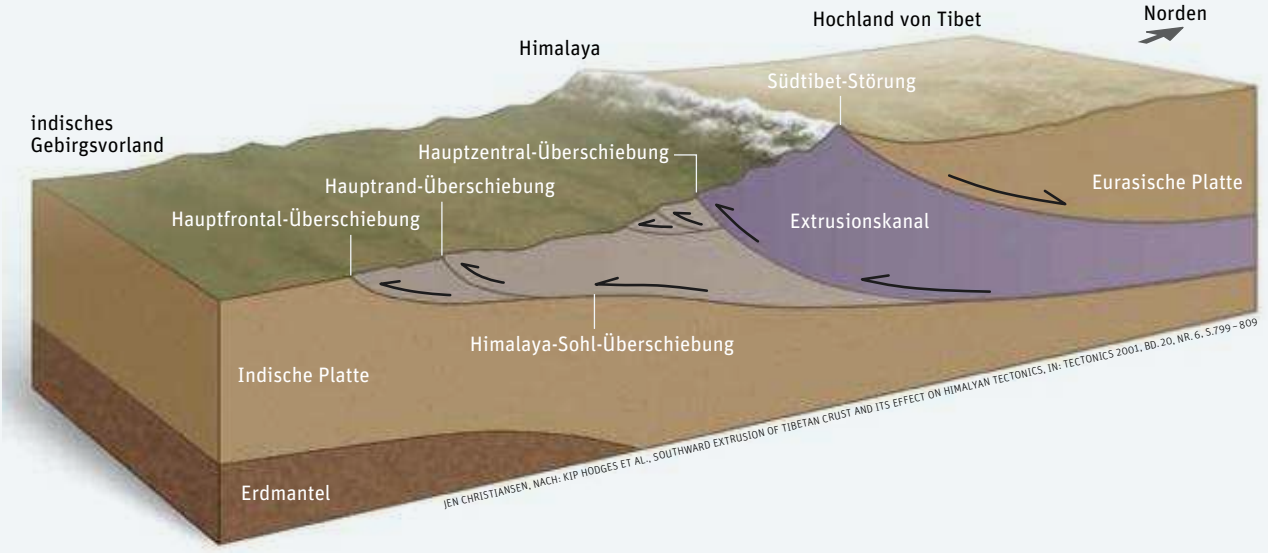
Seither haben verschiedene Forschergruppen dieses Extrusionsmodell (von lateinisch *extrudere* = hinausstoßen) verfeinert. Ende der 1990er Jahre untersuchte eine Gruppe um Djordje Grujic von der Dalhousie-Universität in Halifax (Kanada), der damals noch an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich arbeitete, das Mikrogefüge in Gesteinen aus den beiden Verwerfungssystemen und dem Kanal dazwischen. Dabei fand das Team Zerrungsmuster, die von zähplastischer Deformation herrühren, wie sie etwa beim Fließen von Zahnpasta in der Tube auftritt. Der inzwischen verstorbene K. Douglas Nelson von der Universität Syracuse (New York) vermutete, dass im Unteren Miozän eine zähplastische Krustenschicht tief unter Tibet existiert hat. Aus ihr bestünde das inzwischen verfestigte Material, das heute zwischen der Südtibet- und der Hauptzentral-Verwerfung an der Erdoberfläche ansteht.

Die meisten Varianten des Kanal-Extrusionsmodells beschreiben die Entwicklung des Himalaya-Tibet-Systems im Miozän. Doch mehren sich die Hinweise darauf, dass der Vorgang bis heute andauert. Verschiedene Forschergruppen haben eine Chronologie der Verschiebungen an den Hauptverwerfungssystemen im Himalaya aufgestellt. Die dazu benutzten geologischen Uhren basieren auf dem radioaktiven Zerfall bestimmter Elemente in Mineralen, die im Zuge geologischer Vorgänge auskristallisiert sind.

Wie die Datierungen zeigen, kam es nahe oder unmittelbar südlich der Stellen, an denen die Hauptzentral-Überschiebung und das Südtibet-Störungssystem austreten, innerhalb der letzten 20 Millionen Jahre mehrfach zu Scherbewegungen im Gestein. Die letzte solche Verformung fand nach geologischen Maßstäben vor extrem kurzer Zeit statt: Untersuchungen meiner Forschungsgruppe zufolge waren in Zentralnepal noch in den letzten Jahrtausenden Strukturen aktiv, die einen Extrusionskanal begrenzt haben könnten. Dort drängt somit vielleicht bis heute Material an die Oberfläche. ▷

Bewegung unter dem Dach der Welt

Die Ränder tektonischer Platten zersplittern beim Zusammenstoß in Schollen, die sich übereinanderschieben und durch Scherflächen getrennt sind. Das lässt sich sehr schön im Süden des Himalaya erkennen. In der Nähe des Hauptkamms befindet sich jedoch eine andere Art von Scherfläche, die unter das Tibet-Plateau abtaucht. An dieser so genannten Südtibet-Störung schiebt sich die höhere Scholle nicht über die tiefere, sondern gleitet von ihr ab. Zwischen ihr und der Himalaya-Sohl-Überschiebung liegt somit ein Krustenblock, der sich entgegengesetzt zu den beiden angrenzenden bewegt. Er bildet sehr wahrscheinlich das äußere Ende des Kanals mit zähplastischem Gesteinsmaterial, das von Tibets Unterkruste nach Süden drängt.



JEN CHRISTIANSEN, NACH: KIP HODGES ET AL., SOUTHWARD EXTRUSION OF TIBETAN CRUST AND ITS EFFECT ON HIMALYAN TECTONICS, IN: TECTONICS 2001, BD. 20, NR. 6, S. 799–809

Wenn die geschilderte Kanal-Extrusion die Entwicklung des Himalaya entscheidend geprägt hat, sollte sich das Gebiet zwischen der Südtibet-Störung und der Hauptzentral-Überschiebung ungewöhnlich schnell heben. Indizien dafür liefert die Landschaft selbst. In Gebirgen sorgt eine rasche Hebung in der Regel für ein steiles Relief. Tatsächlich ist die Steigung an der Südseite des Himalaya ziemlich extrem. Das spiegelt sich auch in einem äußerst starken Gefälle der Flüsse wider.

Genaue Vermessungen der Topografie sowohl mit traditionellen Methoden als auch mit den GPS-Satelliten ergaben außerdem, dass sich während der vergangenen drei Jahrzehnte der Boden im Bereich der vermuteten Kanal-Extrusion relativ zur südlich angrenzenden Region um einige Millimeter pro Jahr gehoben hat. Allerdings bleibt offen, ob diese schnelle Hebung nur eine aktuelle kurzzeitige Erscheinung ist oder über geologische Zeiträume hinweg angedauert hat.

Aufschluss darüber kann die Erosionsgeschichte am Südhang des Himalaya geben. Wenn das Gebiet in der Vergangenheit ebenso stark angehoben wurde wie heute, muss viel Gestein abgetragen worden sein. Eine der besten Methoden zur Bestimmung der Erosionsrate über Zeiträume von Jahrtausenden hinweg basiert auf der natürlichen Produktion so genannter kosmogener Nuklide. Das sind Isotope wie Beryllium-10 oder Aluminium-26, die durch kosmische Strahlung entstehen. Ihre Konzentration in Oberflächengestein – bis zu einer Tiefe von gut einem halben Meter – nimmt mit dessen Expositionsdauer zu. Je stärker also die Abtragung ist, desto schneller wird frisches Material freigelegt und desto geringer ist der Gehalt des Bodens an kosmogenen Nukliden.

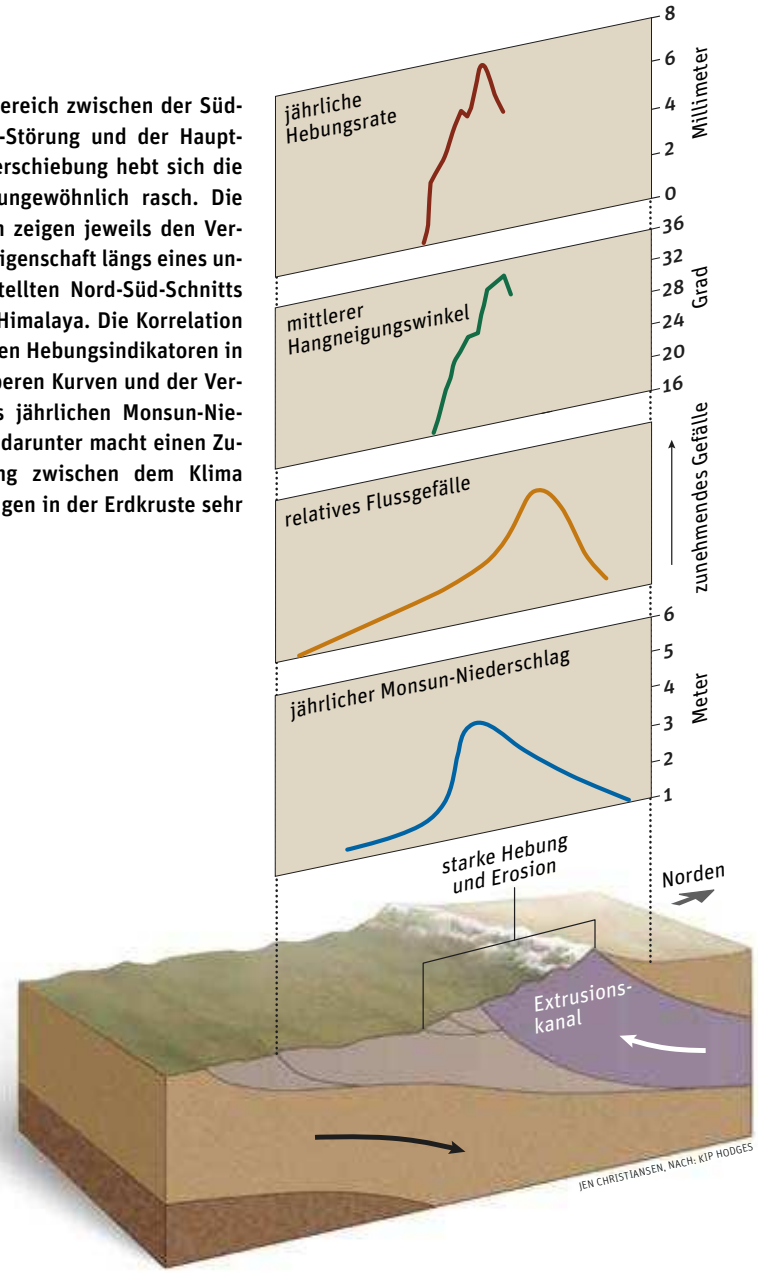
Diese Methode haben meine MIT-Kollegen Cameron Wobus und Kelin Whipple zusammen mit mir und Arjun Heimsath vom Dartmouth College in Hanover (New Hampshire) auf den Bereich mutmaßlicher Extrusion in Zentralnepal angewandt. Dabei maßen wir eine dreimal so hohe Erosionsrate im Jahrtausendmaßstab wie in der südlich angrenzenden Region.

Monsunbedingte Krustenhebung

Mit anderen Methoden lässt sich die einstige Abtragungsgeschwindigkeit über noch längere Zeiträume hinweg ermitteln. Ich habe bereits geologische Uhren erwähnt, die auf dem Zerfall radioaktiver Elemente beruhen und angeben, wie lange die Kristallisation eines Minerals zurückliegt. Es gibt jedoch Varianten davon, mit denen sich auch spätere Ereignisse in der Geschichte eines Gesteins datieren lassen: etwa der Moment, in dem es nach der Kristallisation in heißen Regionen tief im Untergrund auf eine bestimmte Temperatur abkühlte, weil es durch die Abtragung der Schichten darüber immer näher an die Oberfläche gelangte.

Meine Kollegin Ann Blythe von der Universität von Südkalifornien in Los Angeles und meine Doktorandin Kate Huntington haben solche Thermochronometer auf Gesteinsproben aus der Annapurna-Kette angewandt, die in Zentralnepal an der Stirnseite des Himalaya liegt. Ihren Messungen zufolge ist die Erosion in dieser Zone mutmaßlicher Kanal-Extrusion seit mindestens einigen Millionen Jahren deutlich erhöht. Insgesamt belegen somit sowohl aktuelle topografische Messungen als auch die Konzentration kosmogener Nuklide und die Thermochronometrie eine rasche Hebung, die schon seit sehr langer Zeit anhält.

Wenn die von uns vermutete Rückkopplung zwischen verstärkter Erosion an der Südseite der Himalaya-Kette und der Extrusion von Gesteinsmaterial aus dem Krustenkanal unter Tibet zutrifft, sollte das Hebungsmuster die regionale Verteilung monsunbedingter Regenfälle widerspiegeln, die ja der Hauptgrund für die Abtragung sind. Mehrere Forschergruppen haben jüngst die niedergehenden Wassermengen an verschiedenen Stellen ermittelt. Dabei stützten sie sich auf Daten, die von Fernerkundungssatelliten und Wetterstationsnetzen stammen.



Im Bereich zwischen der Südtibet-Störung und der Hauptzentral-Überschiebung hebt sich die Erdkruste ungewöhnlich rasch. Die vier Kurven zeigen jeweils den Verlauf einer Eigenschaft längs eines unten dargestellten Nord-Süd-Schnitts durch den Himalaya. Die Korrelation zwischen den Hebungsindikatoren in den drei oberen Kurven und der Verteilung des jährlichen Monsun-Niederschlags darunter macht einen Zusammenhang zwischen dem Klima und Vorgängen in der Erdkruste sehr plausibel.

In einem gemeinsamen Projekt mehrerer Institutionen unter Leitung von Ana Barros von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) ging es zum Beispiel darum, das Verteilungsmuster des Monsunregens in der Annapurna-Kette seit 1999 zu ermitteln. Dabei zeigte sich, dass die Niederschläge in der Tat dort am höchsten sind, wo andere Untersuchungen eine besonders starke Erosion und Hebung ergeben hatten. Die Region mit den meisten monsunbedingten Regenfällen und die Zone mutmaßlicher Extrusion fallen also im Wesentlichen zusammen.

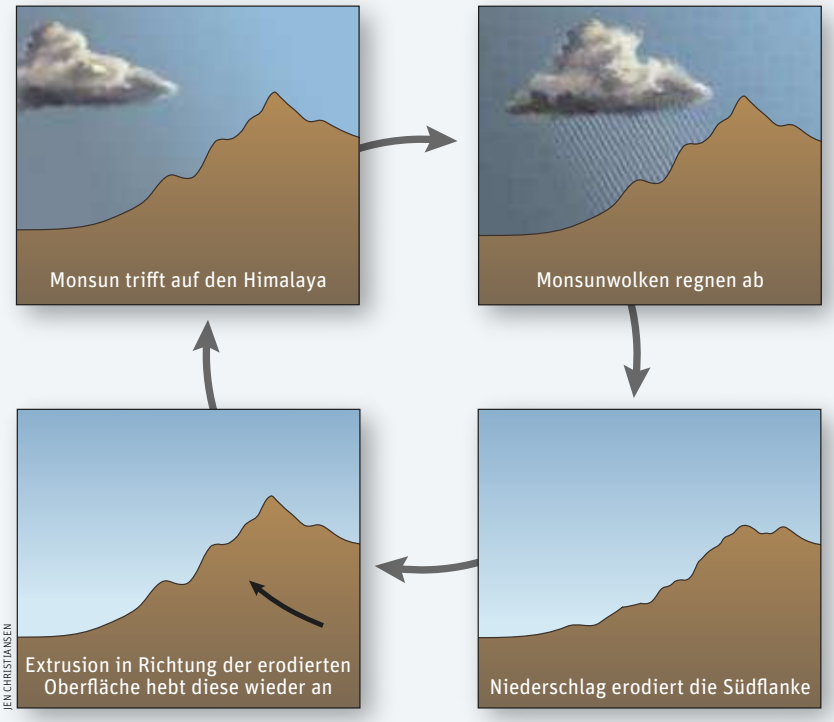
Das passt hervorragend zu der Hypothese, wonach die Erosion an der Stirnseite der Himalaya-Kette – gesteuert vom indischen Monsun – das langsame, stetige Auspressen von zähplastischem Gestein aus einem Kanal unter Tibet ermöglicht. Diese Extrusion erneuert somit unablässig den Gebirgswall, der dem Monsun den Weg nach Norden versperrt. Dadurch wiederum geht der Regen weiterhin an der Stirnseite des Gebirges nieder und verursacht dort jene verstärkte Erosion, die ihrerseits die Extrusion begünstigt. Damit schließt sich der Kreis.

Theoretische Untersuchungen stützen diese Sichtweise. Chris Beaumont und seine Kollegen an der Dalhousie-Universität erforschen mit Computermodellen den Einfluss der Erosion auf Systeme mit mechanisch schwachen Kanälen in der Unterkruste. In einem Fall haben sie die wesentlichen physikalischen Merkmale des Himalaya-Tibet-Systems im Miozän nachgebildet. Wie sich herausstellte, zerfließt dort, wo an der Oberfläche nur geringe Erosion herrscht, ein Kanal mit pastösem Gestein in der unteren Kruste langsam und ziellos nach allen Seiten. Hingegen steigt er in Bereichen starker Erosion zur Oberfläche auf – wie an der Stirnseite des Himalaya.

Mögliche Rückkopplungen zwischen Klima und Gebirgsbildung wurden erst vor Kurzem erkannt. Seither fühlen sich Forscher, die sich zuvor nur mit ihrem jeweiligen Spezialgebiet – etwa der Tektonik – befassten, in eine aufregendere Welt versetzt, deren Phänomene viel stärker miteinander verknüpft sind als bisher gedacht. Dabei dürfte die Integration noch weitergehen. So wie sich jetzt schon Geowissenschaftler, Meteorologen, Hydrologen und Klimatologen zusammenschließen, könnte schon bald die Biologie in die »neue« Tektonik eingebunden werden. Denn wenn das Klima Berge versetzt, schaffen Ökosysteme das vielleicht auch. ◁

Feedback zwischen Erosion und Extrusion

Zwischen Monsun und Himalaya besteht eine Rückkopplungsschleife, die hier in vereinfachter Form dargestellt ist. Die Wolken des indischen Sommermonsuns schaffen es nicht, über den Gebirgskamm nach Norden zu gelangen, und regnen stattdessen an seiner Südflanke ab (oben). Die enormen Niederschläge verursachen eine starke Erosion, welche die Kruste an dieser Stelle ausdünnt und damit schwächt. Folglich stößt zähplastisches Krustenmaterial, das aus großen Tiefen unter Zentraltibet nach außen drängt, hier auf wenig Widerstand und schiebt sich nach Süden zur Stirnseite des Himalaya vor. Dort hebt es die erodierte Oberfläche rasch wieder an und regeneriert damit die Gebirgsfront, sodass diese die Monsunwolken weiterhin aufhalten kann. Damit schließt sich der Kreis.



Kip V. Hodges wurde nach 23 Jahren an der geologischen Sektion des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge im vergangenen Juni Gründungsdirektor der neuen Abteilung für Erd- und Raumerkundung an der Arizona State University in Phönix. Er hat an der Universität von North Carolina in Chapel Hill Geologie studiert und am MIT promoviert. Außer im Himalaya und im Hochland von Tibet führte er auch tektonische Untersuchungen in Skandinavien, Ostgrönland, Irland, Mexiko, Peru und den USA durch.

Quaternary deformation, river steepening, and heavy precipitation at the front of the higher Himalayan ranges. Von Kip V. Hodges et al. in: Earth and Planetary Science Letters, Bd. 220, S. 379, 2004

Has focused denudation sustained active thrusting at the Himalayan topographic front? Von Cameron W. Wobus et al. in: Geology, Bd. 31, S. 861, Oktober 2003

Monitoring the monsoon in the Himalayas: observations in central Nepal, June 2001. Von Ana P. Barros und Timothy J. Lang in: Monthly Weather Review, Bd. 131, S. 1408, 2003

Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. Von C. Beaumont et al. in: Nature, Bd. 414, S. 738, 13. 12. 2001

Southward extrusion of Tibetan crust and its effect on Himalayan tectonics. Von K. V. Hodges et al. in: Tectonics, Bd. 20, S. 799, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/861281.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

CARY WOLINSKY

Ersatz für Tierversuche – nicht nur zum Tierschutz

Neue intelligentere Prüfverfahren reduzieren den Verbrauch und das Leid von Versuchstieren. Dadurch werden die Sicherheitstests sogar zuverlässiger.

Von Alan M. Goldberg
und Thomas Hartung

Ein übermannsgroßes Plüschkarnickel blieb dem damaligen US-Vizepräsidenten und späteren Präsidentschaftskandidaten Al Gore bei Wahlkampagnen im Jahr 1999 monatelang auf den Fersen. Es verfolgte den amerikanischen Politiker, weil er ein neues Programm für Sicherheitstests von chemischen Stoffen in die Wege geleitet hatte – was Leid und vielfach Tod für fast eine Million Versuchstiere bedeutet. Trotzdem hielten breite Kreise das neue Regelwerk für längst überfällig.

Zwei Jahre zuvor hatte eine amerikanische Umweltvereinigung darauf aufmerksam gemacht, dass von den meisten in den USA gemeinhin verwendeten Chemikalien keine ausreichenden Daten über ihr Gefahrenpotenzial für Gesundheit und Umwelt existierten. Nur zu vielleicht jedem vierten der etwa hunderttausend gebräuchlichen Stoffe lag eine hinreichende Risikobewertung vor. Dem Aufruf schlossen sich sowohl die US-Umweltbehörde »Epa« als auch der Vorläufer des heutigen amerikanischen Chemieindustrieverbands an. Gore war es dann gelungen, Umweltaktivisten, Behörden und Industrie zusammenzubringen und jenes Programm ins Leben zu rufen: Für die 2800 Chemikalien, von denen die USA jährlich über umgerechnet rund 450 Tonnen produziert oder importiert, sollten Mindestsicherheitsprüfungen erfolgen.

Nun aber legte das Plüschkarnickel den Finger in eine offene Wunde. Ohnehin lassen bei vorgeschriebenen toxikologischen Tests schon viele Millionen Labortiere pro Jahr ihr Leben. Wegen des neuen Programms würde der Tierverbrauch nochmals drastisch ansteigen.

Diesseits des Atlantiks ist die Lage nicht weniger umkämpft. Auch in Europa verbrauchen zwingende Toxizitätstests jährlich Millionen an Versuchstieren, wogegen Tierschutzverbände seit Jahren agieren. Obendrein verabschiedete nun die Europäische Union Ende 2006 ein neues Chemikalienrecht, das ab Mitte 2007 umgesetzt werden soll. Bekannt ist es unter der Abkürzung »Reach« (für: Registrierung, Evaluierung und Autorisierung von Chemikalien). Neue Chemieprodukte, vor allem aber erstmals zigtausende Altstoffe sollen auf ihr Gefahrenpotenzial hin geprüft werden. Darunter fallen alle Chemikalien, von denen in den EU-Staaten im Jahr mehr als eine Tonne hergestellt oder gehandelt werden – insgesamt rund 30 000 Stoffe. Der britische Medizinische Forschungsrat veranschlagte für diese Tests in einer Kalkulation von 2001 eine Zeitspanne von 40 Jahren, Kosten von über 8 Milliarden Euro und den Verbrauch von über 13 Millionen Versuchstieren.

Harte Verhandlungen

Der Gesetzeskompromiss Reach gelang erst nach jahrelangem Ringen zwischen den unterschiedlichen Interessenseiten und gilt als eines der größten und schwierigsten Gesetzgebungsverfahren in der EU. Nur mit vielen gegenseitigen Zugeständnissen ließen sich die Anliegen von Verbrauchern und Politik, chemischer Industrie und Umweltschutz, Medizin und Tierschutz vereinbaren.

Sicherheitstests sind notwendig, das ist unstrittig. Aber sind wir dafür wirklich auf dermaßen viele Tierversuche angewiesen? Eine kleine Fraktion von Wissenschaftlern auf der ganzen Welt, darunter auch wir beide, bemüht sich seit Jahrzehnten um humanere Verfahren. Manche dieser Experten arbeiten in der Industrie, andere in öffentlichen Forschungseinrichtungen, einige auch in der Politik. Von den neuen EU-Richtlinien wie auch vom neuen US-Programm fühlen wir uns erst recht gefordert. So brachte einer von uns (Goldberg) auf eine Anfrage des eingangs erwähnten Umweltverbands hin Forscher mehrerer amerikanischer Universitäten zusammen, die sich damit befassen, wie man bei den geforderten Chemikalienprüfungen mit weniger Tieren auskäme.

In Deutschland gibt es am Bundesinstitut für Risikobewertung seit 1989 die »Zentralstelle zur Erfassung und Bewertung von Ersatz- und Ergänzungsmethoden zum Tierversuch (Zebet)«. Unter anderem erstellt Zebet eine Datenbank zu Alternativmethoden für gesetzlich vorgeschriebene Tierversuche. Die deutsche Zentralstelle entwickelt und prüft solche Verfahren auch selbst beziehungsweise gibt so genannte Validierungen (Prüfungen und Bewertungen) in Auftrag – zum Ziel, Tierversuchsalternativen national und international anzuerkennen und durchzusetzen.

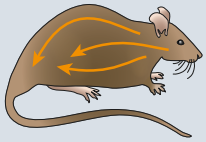
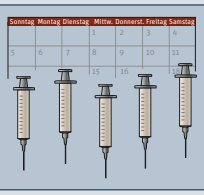
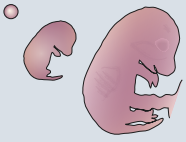
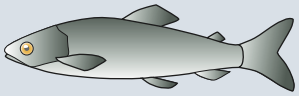
Für die Europäische Union wurde 1993 in Ispra (Italien) das »Europäische Zentrum zur Validierung von Alternativmethoden (Ecvam)« eingerichtet. Ecvam gehört zu der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission, welche die Politik wissenschaftlich unterstützt. Seit 2002 leitet einer von uns (Hartung) diese Institution. Ecvam ist weltweit das führende Referenzzentrum dieser Art. Es arbeitet mit den diversen nationalen Einrichtungen wie Zebet eng zusammen.

Zu den Hauptaufgaben der erwähnten Einrichtungen zählt es, festzustellen, ob Tierversuchsalternativen die Anforderungen der OECD erfüllen. Der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung gehören 30 Industrienationen an, darunter auch Deutschland und die USA. Die OECD versucht, unter anderem Testmethoden zwischen den Mitgliedsstaaten zu vereinheitlichen. Die genannten Validierungszentren erarbeiten, welche Testdaten man jeweils dazu braucht, um über das Gefahrenpotenzial einer chemischen Substanz verlässliche Aussagen zu erzielen. Nach den derzeitigen amerikanischen Vorschriften unter Verwendung von OECD-Methoden benötigt man pro Chemikalie 430 Versuchstiere. Allerdings hat sie einzelne innovative, im Tierverbrauch sparsamere Prüfschemata bereits anerkannt. ▷

In Kürze

- Für **vorgeschriebene Sicherheitsprüfungen** an Medizinprodukten und Chemikalien werden jedes Jahr Millionen von Versuchstieren benötigt.
- Mit **alternativen Methoden** sowie **verbesserten Versuchsprotokollen** sinkt zum einen der Tierverbrauch, zum anderen leiden Versuchstiere weniger. Zu den wichtigsten Neuerungen gehören: eine optimierte statistische Auswertung; Beobachtung der Tiere mit nichtinvasiver Bildgebung; Tests an Zell- und Gewebekulturen.
- Die neuen Ansätze sparen Geld und Zeit. In ihrer toxikologischen Aussage sind sie obendrein **zuverlässiger als die herkömmlichen Verfahren**.

Testbatterie für Toxizitätstests

	herkömmliche Prüfverfahren	Alternativmethoden
	**Toxikokinetik** erfasst Aufnahme, Verteilung, Verstoffwechslung und Ausscheidung von Stoffen im Körper; Substanz wird verfüttert; Blut, Urin und Kot werden in Abständen untersucht; Tiere werden dann getötet, um alle Stoffreste und Stoffwechselprodukte in Organen zu bestimmen	Industrie verwendet zum Teil Zellkulturen und Simulationen (In-vitro- beziehungsweise In-Silico-Methoden); ein In-vitro-Ansatz für die Hautabsorption von der OECD zugelassen
	lokale (topische) Wirkung – Auftrag auf Haut, Hornhaut beziehungsweise Augenschleimhaut, seltener Schleimhaut von Mund oder Vagina; Prüfung auf Rötung, Blasenbildung, Verätzung und anderes	von der OECD genehmigte Alternativtests auf Verätzung, Phototoxizität und Allergenpotenzial; Ecvam prüft Ersatzmethoden zu Haut- und Augenreiztests, Allergiereaktionen und Photogenotoxizität (Erbgutschäden durch die Substanz bei Lichteinwirkung)
	akute systemische Toxizität (Wirkung auf Organe) – Stoff wird binnen 24 Stunden einmal oder mehrfach geschluckt, Folgen werden 14 Tage lang erfasst; hierunter fällt der klassische LD_{50}-Test, der die Dosis ermittelt, bei der die Hälfte der Tiere stirbt: früher 140 Tiere in 6 bis 7 Versuchsgruppen	Ein von der OECD akzeptiertes alternatives Testschema benötigt durchschnittlich 16 Tiere. Ecvam arbeitet an einem Verfahren ohne Tierversuche. Gemeinsam prüfen Ecvam und Iccvam einen In-vitro-Ansatz zur Ermittlung einer Anfangsdosis für LD_{50}-Tests, wodurch nur noch 6 Tiere benötigt würden
	**chronische Toxizität / wiederholter Kontakt** – zahlreiche Prüfverfahren testen an Tieren, ob Organfunktionen bei chronischer Belastung ausfallen	noch keine offiziell validierten Verfahren; im Einsatz unter anderem Messungen bestimmter Zellfunktionen, von Genaktivitäten mit Chips, nichtinvasive Kontrollstudien an Tieren beispielsweise mit moderner Bildgebung (wie MRI, Pet, Biophotonik)
	**Embryonalentwicklung / Fortpflanzung** – Wirkung auf Eizellen, Spermien, Fruchtbarkeit, Feten, Jungtiere; Effekte in oder nach der Pubertät des Nachwuchses	Industrie verwendet nichtinvasive Prüfverfahren am lebenden Tier; auch mehrere In-vitro-Methoden; drei Toxizitätstests am Embryo von Ecvam positiv bewertet; andere Tests stehen kurz davor
	Krebspotenzial (Kanzerogenität) / Erbgutschäden (Mutagenität) – zur Abschätzung des Tumorpotenzials möglichst lebenslange Exposition; wegen der Kosten sind solche Langzeitversuche eher selten	häufig angewandte Alternativen: In-vitro-Verfahren – darunter der Ames-Test an Bakterien; Ecvam lässt derzeit mehrere der Alternativen prüfen
	**Ökotoxikologie** – Wirkung auf die Umwelt; ein junges Forschungsfeld; testete von Anbeginn »einfachere« Organismen, wie Fische, Algen, Wasserflöhe	ein Abwassertest mit Fischeiern in Deutschland und Schweden zugelassen; ein von Ecvam validiertes Verfahren senkt den Fischverbrauch um 60 Prozent
	biogene medizinische Produkte – Qualitätsprüfung von Impfstoffen und anderen Bioprodukten für medizinische Zwecke; Tests auf Fieber auslösende bakterielle Verunreinigungen (Pyrogene); in der Regel wird eine Anzahl Tiere mit dem Impf- oder Wirkstoff behandelt und der Krankheit ausgesetzt; eine Kontrollgruppe wird mit der Krankheit konfrontiert, bleibt aber unbehandelt oder ist nicht geimpft	ein Bluttest (der Lal-Test) zum Pyrogennachweis im Einsatz; neue Prüfverfahren für Zytokine validiert; von Ecvam geprüfte statistische Verfahren kommen mit weniger Tieren aus; verfeinerte Impfstofftests mindern Leiden

OECD: Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
Ecvam: Europäisches Zentrum für die Validierung von Alternativmethoden
Iccvam: US-Gremium für die Validierung von Alternativmethoden

EMILY COOPER

▷ So konnten wir zeigen, dass man pro Chemikalie auch mit 86 Versuchstieren auskommt, einem Fünftel – ohne Informationsverlust und ohne die Vorgaben zu verletzen. Hingegen benötigen besonders gefährliche Chemikalien und solche, die in sehr großen Mengen produziert werden, noch immer oft fünf- bis zwölftausend Tiere.

Wer Alternativen zu Tierversuchen erforscht, sah sich bisher gleich von mehreren Seiten angegriffen. Radikale Tierschützer bezeichneten dergleichen gern als Feigenblatt, um den Tiereinsatz letztlich doch zu rechtfertigen. Viele Wissenschaftler wiederum verspotteten den Ansatz als Gefühlsduselei. Doch inzwischen haben wir uns auf dem schmalen Grat festgesetzt, an dem sich diese beiden Interessengruppen berühren. Tatsächlich hat sich dank dieser Forschungen bei den Sicherheitsprüfungen von chemischen und biologischen Produkten bereits viel getan.

Hierzu muss man wissen, dass die Bestimmungen für Unbedenklichkeitsprüfungen in den einzelnen Ländern durchaus voneinander abweichen. Man nehme nur Kosmetika. In der Europäischen Union darf seit 2003 kein Kosmetikprodukt mehr verkauft werden, das als Endprodukt im Tierversuch getestet wurde, und dasselbe gilt für die Inhaltsstoffe – sofern es Alternativtests gibt. Bis 2009 sollen Tiertests von verwendeten Inhaltsstoffen völlig untersagt sein. In den USA sind die Bestimmungen für Kosmetika lascher. Ergebnisse von Sicherheitstests müssen nur auf Verlangen nach der Markteinführung vorgelegt werden. Falls vom Verbraucher Beschwerden kommen, gibt es allerdings mittlerweile Richtlinien. Insbesondere müssen dann Ergebnisse des umstrittenen Draize-Tests vorgelegt werden, dem Augentest an Albino-Kaninchen, wobei die Substanz den Tieren ins Auge getropft oder geschmiert wird.

Zähe Anpassung von Behörden

Genau festgelegt sind hingegen in Europa und in den USA Sicherheitstests von Agrochemikalien. Die Prüfung eines Pestizids etwa dauert mindestens zwei Jahre und erfordert annähernd 10 000 Tiere mehrerer Arten. Zuerst wird festgestellt, ob die betreffende Substanz über die Haut aufgenommen wird, ob sie eingeatmet werden kann, und auch, ob auf den Pflanzen Reste verbleiben, die Menschen unter Umständen schlucken würden. Für jeden dieser Fälle ist dann Verschiedenes zu klären, zum Beispiel die mögliche Expositionsdauer von Personen oder die im ungünstigen Fall aufgenommene Menge. Man muss auch wissen, wie sich die Substanz im Körper verteilt. All dies muss für Menschen verschiedener Altersklassen, auch für ungeborene Kinder, ermittelt werden.

Die anschließend erforderlichen Toxizitätstests zur Wirkung einer Chemikalie auf Lebewesen sind noch am wenigsten aufwändig, wenn die Substanz nicht ins Blut gelangt. Dann sind »nur« Haut- und Augentests nötig. Andernfalls gilt es, mögliche Auswirkungen auf die einzelnen Organe zu untersuchen – einschließlich des Effekts von Reaktionsprodukten der Chemikalien, die erst im Körper entstehen. Das Standardverfahren bedeutet, dass Ratten, Mäuse, Hunde oder andere Säugetiere die Substanz in bestimmten Dosierungen verabreicht bekommen, zum Teil ihr Leben lang. Die Forscher fahnden dabei nach Organerkrankungen, Krebs und dergleichen. Sie beobachten außerdem Nachkommen dieser Tiere über deren volle Lebensspanne. Je nachdem kommen auf allen Stufen noch spezifischere Tests hinzu.

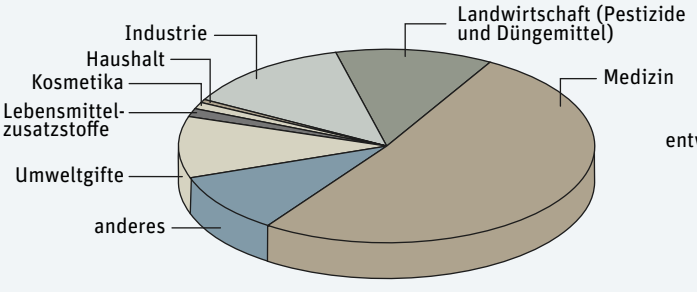
So brutal, wie dies klingt, scheint das Prozedere aber in der Praxis meist nicht abzulaufen. Vertreter von neun multinationalen Konzernen äußerten Goldberg gegenüber, ihre Firmen würden neu entwickelte chemische Produkte nicht gleich an Säugetieren, sondern zuerst möglichst an Zellkulturen oder an Würmern oder Fischen prüfen. Erst wenn das gut geht, würden sie noch die vorgeschriebenen Säugetierversuche durchführen – vor allem, um sich rechtlich abzusichern.

Die Tabelle S. 63 listet die im Regelfall für Arzneimittel und andere Chemikalien verlangte Testbatterie auf. In der Tat fordern die Ämter heute noch meistens die traditionellen Tierversuche. Zum einen halten Firmen manche der besten alternativen Prüfmethoden geheim. Zum anderen vertrauen die Behörden mehr auf Tierversuchsergebnisse alter Manier, haben diese die Menschen doch bisher offenbar ganz gut vor Schaden bewahrt.

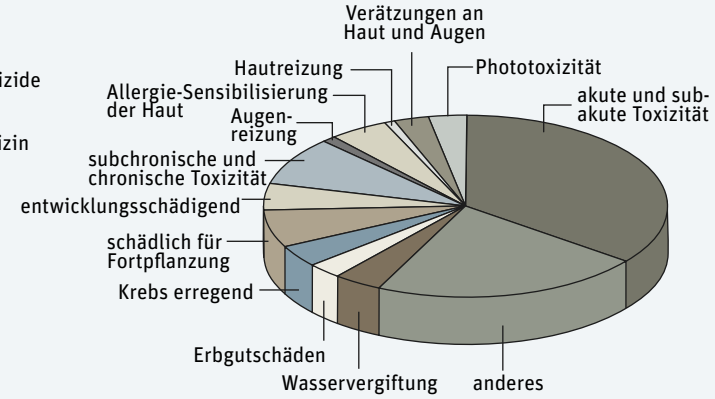
Versuchstierverbrauch in der EU im Jahr 2002

Die Länder der Europäischen Union setzten im Jahr 2002 10,7 Millionen Tiere für Sicherheitsprüfungen ein. Die meisten Tests galten medizinischen Produkten (vor allem der Qualitätskontrolle von Impfstoffen, Medikamenten et cetera) beziehungsweise waren Toxizitätsprüfungen, die eine Palette hochspezifischer Prüfverfahren erfordern.

Verwendungsgebiet der Produkte



geprüftes Gefahrenpotenzial

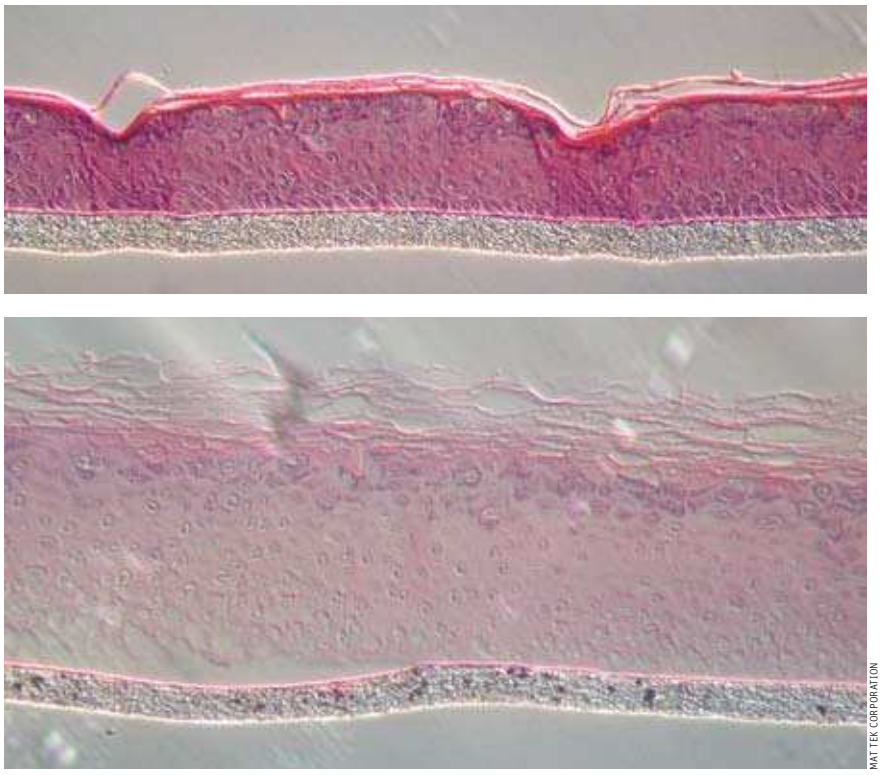


EMILY COOPER, NACH: JOINT RESEARCH CENTER (JRC) DER EUROPÄISCHEN UNION

Erst in letzter Zeit begegnen Ämter alternativen Sicherheitstests offener. Das Konzept, auf das sich unsere Forschungsrichtungen stützen, geht auf das Jahr 1959 zurück. William Russel und Rex Burch, Mitglieder einer universitären Vereinigung britischer Tierschutzorganisationen (Ufaw genannt), formulierten damals das Ziel der »drei R«: »replace – reduce – refine«. Anzustreben sei, Tierversuche zu ersetzen *(replace)*, den Tierverbrauch zu verringern *(reduce)* und das Leiden zu vermindern *(refine)*. Heute sprechen Experten oft auch von »replacement – reduction – refinement«. Daran halten wir uns noch heute, wenn auch bei den heutigen Alternativmethoden die Grenzen zwischen den drei Zielen oft verwischt sind.

Zunächst zum zweiten Ziel *(reduction)*: Die Zahl der verwendeten Tiere lässt sich mit neueren Prüfschemata tatsächlich oft stark reduzieren. Man muss die Tests von vornherein so konzipieren, dass sie mit der geringstmöglichen Anzahl an Tieren trotzdem alle nötige Information liefern. Zum Beispiel erfassen Tests auf akute systemische Toxizität eines Stoffs (akute Giftigkeit für den Organismus) die gesundheitlichen Folgen im Verlauf von zwei Wochen, nachdem das Tier die Substanz einmal oder mehrfach binnen 24 Stunden erhalten hatte. Am gebräuchlichsten ist der LD_{50}-Test (letale Dosis 50 Prozent). Er ermittelt, welche Substanzmenge bei 50 Prozent der Tiere tödlich (letal) wirkt. Früher testete man sechs oder sieben verschiedene Dosierungen jeweils an zehn Männchen und zehn Weibchen, insgesamt rund 150 Tiere pro Substanz. Mit der Zeit erkannten die Forscher, dass diese Tierzahl völlig überzogen war, im wahrsten Sinn des Wortes ein Overkill. Seit 1989 werden die Daten mit einem Prüfschema gewonnen, bei dem 45 Tiere genügen. Seit 2001 akzeptiert die OECD nur noch ein alternatives Testschema, das mit durchschnittlich 16 Tieren auskommt. Und diese Entwicklung geht weiter: Eine kürzlich abgeschlossene Studie in Europa und den USA verspricht, bald pro Prüfsubstanz nur noch durchschnittlich sechs Versuchstiere zu benötigen.

Ein anderes gutes Beispiel, wie sich der Tierverbrauch deutlich senken lässt, stellen die modernen nichtinvasiven Bildgebungsverfahren dar, die den Körper »durchleuchten«: Röntgenaufnahmen und vor allem die verschiedenen Arten von Tomografien, die viele innere Feinheiten aufzeigen. Früher wurden im Verlauf einer Studie in bestimmten Abständen einige Tiere getötet und dann auf Organschäden, etwa Leberdefekte, hin untersucht. Heute kann man Organveränderungen eingriffsfrei am selben Tier verfolgen. Zum einen ist diese Art der Datenerhebung präziser. Zum anderen sinkt der Tierverbrauch um bis zu 80 Prozent.



Synthetische Haut kann die rasierte Rückenhaut lebender Kaninchen ersetzen. Das obere abgebildete Präparat lag drei Minuten in Wasser, das untere war ebenso lange einer Lauge ausgesetzt. Der Schaden durch die Lauge ist deutlich zu sehen.

Fortschrittliche Impfstofftests verkürzen das Leiden

Eine Methode der Zukunft dürfte die moderne Biophotonik sein, wobei man aus Lichtinformation Schlüsse zieht (siehe Bild S. 66 oben). Das Ehepaar Christopher H. und Pamela R. Contag von der Stanford-Universität (Kalifornien) entwickelte Tests, die nicht nur Tiere einsparen helfen, sondern auch erlauben, deren Leid frühzeitig zu beenden. Möchten Forscher etwa beobachten, wie sich ein Krebs im Organismus ausbreitet, versehen sie die Krebszellen vor der experimentellen Einpflanzung in das Tier mit einem Gen für einen Leuchtstoff. Die Krebszellen bilden dann zum Beispiel Luciferase, ein in der Tierwelt häufiges Leuchtenzym. Spezielle Lichtdetektoren erfassen nun das Krebswachstum lange bevor Tumoren ertastet werden können. Mit diesem Ansatz lässt sich auch beobachten, ob und wie stark bestimmte Krebsmittel wirken. Die Biophotonik eignet sich ebenfalls zum Studium von Frühstadien vieler anderer Krankheiten und deren Behandlung. Die Tiere werden so weniger gequält und erleiden weniger Stress.

Zur Leidensminderung *(refinement)* bei qualvollen Versuchen trägt bei, Krankheitszustände – sprich eindeutige Symptome – festzulegen, bei denen ein Versuch vorzeitig beendet werden darf. Einen möglichst frühen Zeitpunkt zu definieren, ab dem man das Tier nicht länger leiden lässt, ist vor allem für Impfstofftests ein Fortschritt. Es gibt etwa Erfahrungswerte, ab wann sich Tiere bei stark abgesunkener Körpertemperatur nicht wieder erholen und nur noch dahinsiechen würden. Oder bei Tollwutimpfstoffen: Falls ein geimpftes Tier nach der experimentellen Infektion mit dem Tollwutvirus anfängt, sich im Kreis zu drehen, ist dies ein klares Anzeichen dafür, dass die Impfung versagt hat. Das Tier kann man sofort möglichst schmerz- ▷

▷ frei töten und ihm damit den stundenlangen Todeskampf ersparen.

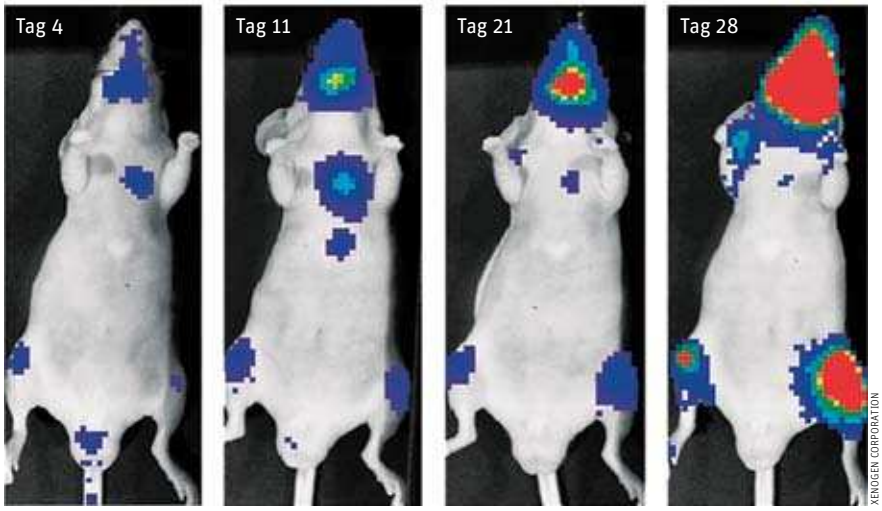
Ob ein Impfstoff wirkt, lässt sich heute mit immunologischen Tests sogar noch rascher erkennen. Statt nach der Infektion auf sichtliche Krankheitssymptome zu warten, ermittelt man nur die Antikörpertiter nach der Impfung. Nicht zuletzt können auch Schmerz- und Betäubungsmittel dazu beitragen, Qualen im Versuch zu mildern.

Unter den Ansätzen, das Leiden von Tieren herabzusetzen, bilden Tests an niederen Wirbeltieren und Wirbellosen eine eigene Kategorie. Denn es gibt Gründe anzunehmen, dass solche Tierarten Schmerz und Stress generell weniger erleben. Der Zebrafisch und ein Fadenwurm gehören heute zu den bevorzugten Organismen, etwa um den Einfluss von Chemikalien auf die Entwicklung des Zentralnervensystems zu untersuchen. Mehr noch: Von beiden Tieren kennen Forscher die Funktion aller unverzichtbaren Gene. Sie wissen, was deren Proteine in der Zelle tun. Unter Umständen genügt es, im Reagenzglas mit Genchips herauszufinden, ob sich eine Substanz auf Genaktivitäten auswirkt, ob dadurch etwa Gene an- oder abgeschaltet werden. Solch ein Chip kann zum Beispiel die 9000 lebenswichtigen Gene des Zebrafischs tragen.

Einige Firmen stellen entsprechende Chips mit menschlichen Erbsequenzen her. Sie bestücken sie unter anderem mit jenen Genen, die vermutlich die Zellreaktion auf Giftstoffe kontrollieren. Noch ist es alles andere als einfach, die von solchen Genchips gelieferten Daten zu interpretieren. Doch in der Zukunft dürfte diese Technologie unser ambitioniertestes Ziel unterstützen: nämlich auf Tierversuche verzichten zu können.

Die meisten Erfolge in diesem Bereich verdanken wir weniger dem Verlangen nach einem menschlicheren Umgang mit Tieren als vielmehr dem rasanten Fortschritt unserer Gesellschaft bei billigen, schnellen und leistungsstarken Technologien. Beispielsweise erforderten Hormontests, etwa Schwangerschaftstests, früher meist langwierige Prüfungen an lebenden Tieren. Heute gibt es dafür Ersatzmethoden.

Ein anderes, besonders spektakuläres Beispiel sind die Fortschritte bei den Sicherheitstests von allen Substanzen, die für Injektionen verwendet werden. Solche Präparate können, trotz aller Vorsicht bei der Herstellung, hitzestabile lebensgefährliche Verunreinigungen etwa bakterieller Herkunft enthalten. Jede einzelne Charge solcher Medikamente und Impfstoffe muss darum zwingend auf Fieber auslösende Stoffe – so genannte Pyrogene – geprüft werden. Früher injizierte man die Prüfsubstanzen jeweils Kaninchen und maß Stunden später deren Körpertemperatur.



XENOGEN CORPORATION

Hier wird fortschreitender Krebs mittels Biophotonik an leuchtenden Geweben sichtbar, bevor das Tier solide, erfühlbare Tumoren entwickelt. Das Leiden lässt sich dadurch schneller beenden.

Bluttest statt Tierversuch

In den 1970er Jahren fand Henry Wagner von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) einen alternativen Pyrogentest. Eigentlich wollte er medizinische Checks mit kurzlebigen Radioisotopen entwickeln. Doch die Isotope zerfielen zu schnell, um die vorgesehenen Substanzen zuvor auf Pyrogene testen zu können. Zufällig forschte ein Kollege derselben Universität, Frederick Bang, an Pfeilschwanzkrebsen, die an den Atlantikstränden Nordamerikas massenhaft vorkommen. Bang hatte entdeckt, dass deren »Blut« auf viele wichtige bakterielle Toxine vorhersagbar und messbar reagiert. Davon wusste Wagner. Der neue Pyrogentest wurde in den USA und wenig später auch in Europa schnell zugelassen. Nach dem lateinischen Namen dieser urtümlichen, großen Krebse heißt er Limulus- oder Lal-Test.

Aber der Limulus-Test hat seine Grenzen – er spricht zum Beispiel nicht auf alle Pyrogene an –, abgesehen davon, dass er viele Krebse das Leben kostet. Einen Pyrogentest für das Reagenzglas, der zudem wirklich zuverlässig ist, entwickelten Albrecht Wendel von der Universität Konstanz und einer von uns (Hartung) in den 1990er Jahren. Wir konnten zeigen, dass sich bakterielle Toxine auch mit isoliertem menschlichem Blut nachweisen lassen. Denn weiße Blutkörperchen reagieren auf solche Giftstoffe. Entdecken die weißen Blutzellen Pyrogene, schütten sie Zytokine (Signalstoffe) aus, die im Körper Fieber erzeugen würden. Diese Alternativmethode fand großen Anklang und beginnt sich inzwischen als Pyrogentest durchzusetzen.

Ersatzmethoden *(replacement)* für einige andere Verfahren, so für den oft extrem schmerzhaften Draize-Test am Kaninchenauge, verdanken wir insbesondere dem Bestreben, Tierleid zu vermeiden. Beim Draize-Test wird geprüft, ob die

EYE OF SCIENCE; MIT FRDL. GEN. VON THOMAS HARTUNG

Eine einfache Blutuntersuchung auf Zytokine ersetzt ältere Verfahren, um in medizinischen Präparaten Fieber erzeugende Stoffe – Pyrogene – auszumachen. Die weiße Blutzelle setzt bei Kontakt mit Pyrogene bildenden Bakterien Zytokine frei.

Augenhornhaut oder auch die Schleimhaut durch eine Substanz Schaden nimmt. Vor etwa zehn Jahren begannen einige Forscher, statt lebender Kaninchen Augen von Schlachttieren zu verwenden. In Deutschland wird heute als Alternative oft der Het-Cam-Test angewandt, bei dem die Eihaut der Luftblase angebrüteter Hühnereier für die Prüfung herhalten muss.

Vorteile von Gewebekulturen und Organsystemen

Das Johns-Hopkins-Zentrum für Tierversuchsalternativen, das einer von uns (Goldberg) leitet, finanzierte in den 1980er Jahren Studien zur Eignung von Gewebekulturen menschlicher Hornhautzellen für Sicherheitsprüfungen. Teilweise hierauf geht zurück, dass einige Firmen nun Gewebe züchten, die genau der äußeren Schleimhaut des Auges entsprechen. Hiermit lassen sich nicht nur grobe Schäden durch Testsubstanzen erkennen, sondern auch ganz feine Veränderungen, was zurzeit von Ecvam validiert wird.

Verschiedenste menschliche Zelltypen können Wissenschaftler heute züchten. Dazu gehören auch Haut- und Schleimhaut-, Lungen- und Muskelzellen. Oft gelingt es sogar, an speziellen Gerüststrukturen dreidimensionale Gewebe wachsen zu lassen. Zu nennen sind außer der Augenhornhaut Gewebe von Lunge und Verdauungsorganen sowie aus Hautzellen und Zellen der Mund- und Vaginaschleimhaut. Die Industrie verwendet solche Kunstgewebe bereits weithin anstelle von Versuchstieren. Allerdings gibt es noch Lücken: Für Lebergewebe beispielsweise existiert noch kein für die Testpraxis geeigneter Laborersatz.

Zell- und Gewebekulturen bieten den Vorteil, daran die biologischen Reaktionen auf eine Chemikalie einfacher untersuchen zu können als im Tierversuch. Viele der Vorgänge können nun unmittelbar verfolgt werden, sodass Forscher die beobachteten biochemischen Stoffwechselwege im Reagenzglas nachahmen können. Anhand solcher Modelle dürften künftig Vorhersagen über Effekte von Stoffen im Körper möglich werden – bis hin zur Genebene, zum Zellwachstum und dergleichen.

Neu ist zum Beispiel ein System der Firma AP Research aus Baltimore mit verschiedenen Gewebetypen, die gewissermaßen Funktionen und Zusammenwirken mehrerer Organe nachahmen. Solche Systeme können aufzeigen, wie Stoffwechselprodukte von Chemikalien auf die Organe wirken würden. Dieser Ansatz könnte Tierversuche sogar auf dem wichtigen Gebiet der Toxikokinetik verzichtbar machen – sozusagen des Wegs von Chemikalien und deren Stoffwechselprodukten durch den Körper.

Ein Traumziel wäre, biologische Modellsysteme durch Computermodelle zu ersetzen oder zumindest zu ergänzen. Die pharmazeutische Industrie beginnt bereits damit, Wirkstoffe mittels Computersimulationen von interagierenden Organen auszutesten. Der amerikanische Physiker Charles DeLesi von der Boston-Universität (Massachusetts) und andere ambitionierte Forscher streben ein Großprojekt an, bei dem mit vielen verbundenen Rechnern auf biochemischer Ebene ein virtueller Mensch erstellt werden soll. In der Größenordnung ist dieses Unterfangen dem Humangenomprojekt vergleichbar.

Noch bedeutet es stets einen langen, aufwändigen Prozess mit ungewissem Ausgang, bis Tierversuchsalternativen vorgeschriebene Tests ersetzen dürfen – oder sogar müssen –, das heißt bis die Behörden sie genehmigen und fordern. Eine entscheidende Hürde ist die so genannte Validierung: Labors und Sachverständige müssen prüfen, ob ein neuer Test – beziehungsweise mehrere zusammen in einer Teststrategie – herkömmliche Methoden gleichwertig ersetzt und seinen Zweck wirklich erfüllt. Die Experten müssen ihn als vollwertigen Ersatz akzeptieren. Um diese Abläufe zu gewährleisten, entstand im Jahr 1993 das eingangs erwähnte »Europäische Zentrum für die Validierung von alternativen Methoden«. Ecvam war die Konsequenz der EU-Tierschutzgesetzgebung von 1986, die verlangt, dass wann immer möglich Alternativmethoden verwendet werden müssen. Die Gemeinsame Forschungsstelle der Europäischen Kommission prüft dabei unabhängig, ob eine Alternativmethode hält, was sie verspricht. In den USA wurde für diese Funktionen 1997 das Komitee Iccvam gebildet, das sich dort mit der Koordination der Validierung von Alternativtests befasst.

Gelder für die Suche nach und Prüfung von Tierversuchsalternativen aufzutreiben ist nicht leicht, jedoch ist die Lage in Europa deutlich besser als in den USA. Für Validierungsstudien von al- ▷

wichtige **online** **adressen**

Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion,Technische Berechnung, Strömungsmechanik
www.etastern.de

DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

▷ ternativen Verfahren zahlten staatliche Einrichtungen in den USA in den letzten zehn Jahren kaum 10 Millionen Dollar (etwa 7,5 Millionen Euro). Im selben Zeitraum wendete die EU für die Forschung an Alternativen und deren Validierung über 200 Millionen Euro auf. Hinzu kamen hohe Summen von den einzelnen Regierungen, allein in Deutschland 80 Millionen Euro für die Suche nach neuen Methoden.

Das Schema zu Validierungsstudien von Tierversuchsalternativen entwarfen vor allem europäische Forscher. Es ist ähnlich angelegt und ähnlich fassettenreich wie medizinische Tests. Für jede neue Prüfmethode ist zu beweisen, dass sie die in sie gestellten Anforderungen und Erwartungen auch wirklich erfüllt – ähnlich wie bei einem Medikament der Nachweis geführt werden muss, dass es die erwartete Wirkung hat.

Langwieriger Gutachter-Parcours bis zur Zulassung

Zuerst müssen mit dem neuen Ansatz eine Reihe von Vortests (Prävalidierungsstudien) durchgeführt werden. Sie sollen dessen Reichweite erfassen sowie mögliche Fehlerquellen im Test aufdecken und diese ausbessern helfen. Falls die Vortests zur Zufriedenheit ablaufen, starten (im europäischen Fall) in der Regel Ringversuche: Ecvam kooperiert nun mit Labors in mehreren EU-Staaten zu dem Zweck, den neuen Test in so genannten Blindversuchen an einer großen Anzahl von Substanzen auszuprobieren. Entscheidend ist dabei, dass die verschiedenen Labors unabhängig voneinander die gleichen Ergebnisse gewinnen – dass diese Daten also reproduzierbar sind. Oft prüft jedes der Labors eine Anzahl potenzieller Alternativtests für einen etablierten Tierversuch auf einmal.

Dann bewertet ein Gremium aus etwa 40 Wissenschaftlern die Resultate. Sie vertreten die 25 EU-Mitgliedsstaaten sowie die EU-Kommission, Wissenschaftsverbände, die Industrie und Tierschutzorganisationen. Auch Beobachter vom amerikanischen Validierungskomitee Iccvam und von der OECD sind einbezogen. Falls ein neuer Test alle Anforderungen bestanden hat, erklärt ihn das Gremium für valide.

Das Konzept einer wissenschaftlichen Validierung von Alternativmethoden stieß 1996 bei einem Workshop der OECD im schwedischen Solna international auf breite Zustimmung. Seitdem sprechen die Forscher auch davon, ob ein neuer Test die Solna-Prinzipien oder Solna-Regeln erfüllt.

Ecvam hat bisher 25 Alternativmethoden für Tiertests durch alle Validierungsstadien gebracht. Sie sind nun offiziell validiert. Neun weitere befinden sich auf der letzten Stufe des Bewertungsverfahrens durch Gutachter. Für 40 Methoden laufen derzeit abschließende Laborstudien beziehungsweise Datenanalysen. Die enorme Zahl von 170 Methoden wird derzeit von Ecvam analysiert, viele allerdings noch in frühen Phasen der Optimierung. Ein Beispiel für Alternativen zum vorn beschriebenen Pyrogentest an Kaninchen auf Fieber erzeugende Stoffe sei angeführt: Drei Jahre lang haben zehn Labors sechs Alternativverfahren geprüft, und das mit 190 Proben. Fünf dieser Verfahren bewährten sich im Test, und ihre Eignung wurde von den Gutachtern bestätigt.

Nach der europäischen Gesetzeslage muss eine Tierversuchsalternative für Sicherheitstests, die für zulässig erklärt ist, in der EU fortan auch eingesetzt werden. Leider dauert dieser Schritt trotzdem in den verschiedenen Behörden oft mehrere Jahre. Doch in dem Maße, wie diese mit den neuen Methoden vertrauter werden, dürfte hoffentlich die Bereitschaft wachsen, Ersatzverfahren zu akzeptieren.

Anfangs brachten Testalternativen auch Überraschungen. So scheiterten zu Beginn der 1990er Jahre sechs Ersatzmethoden zum Draize-Test an der Hürde der Validierung. Das war ein schwerer Rückschlag, den sich die Experten damals nicht erklären konnten, zumal die Kosmetikindustrie ein paar jener neuen Verfahren bereits zu ihrer Zufriedenheit anwandte. Erst viel später erkannten wir den Grund für das Scheitern: Die Ersatzmethoden waren dem Draize-Test selbst gegenübergestellt worden. Der aber liefert, so viel wissen wir heute, nicht selten falsch-positive Ergebnisse. Das heißt, er zeigt fälschlich eine gar nicht vorhandene toxische Wirkung an. In einer gemeinsamen Studie überprüfen Ecvam und Iccvam jetzt die vorhandenen Daten zum Draize-Test und den alternativen Ansätzen. Vielleicht wird das schon genügen, um die Eignung mancher jener neuen Verfahren zu erklären. Ansonsten sind wir zuversichtlich, dass eine neuerliche Validierung einigen der Alternativmethoden endlich zur Anerkennung verhilft.

Das Plüschkaninchen, das Al Gore verfolgte, brach an einem heißen Tag ohnmächtig zusammen und Gores Stab leistete erste Hilfe. Sinnbildlich gesprochen wurde der vermeintliche Feind dem gequälten Tier zum Retter. Werden alternative Prüfverfahren voll ausgeschöpft, lässt sich ein Großteil der Tierversuche einsparen.

Um bis zu 70 Prozent kann der Tierverbrauch für die von der EU geforderten Chemikalienprüfungen beispielsweise allein mit den schon vorhandenen und unter Validierung befindlichen Tests erniedrigt werden. Hierin stimmen öffentliche Institutionen und Industrie überein.

Die andere gute Nachricht: Die Tierversuchsalternativen sparen viel Zeit und Geld – Jahre bis Jahrzehnte für Testprogramme und oft Milliarden an Euro und Dollar. Außerdem liefern sie bessere – nämlich härtere und zuverlässigere – Ergebnisse. Einerseits dienen die neuen Methoden dem Wohl unserer Mitgeschöpfe. Gleichzeitig bieten sie uns Menschen mehr Schutz. ◁

Alan M. Goldberg (oben) und **Thomas Hartung** sind Toxikologen. Goldberg leitet das Zentrum für Tierversuchsalternativen der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland). Hartung, der auch an der Universität Konstanz lehrt, ist Leiter des Europäischen Zentrums für die Validierung von alternativen Methoden zu Tiertests (Ecvam) in Ispra, Italien, ein Teil der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission. Goldberg berät die Xenogen Corporation in Alameda (Kalifornien). Hartungs Pyrogen-Test wird von den Charles River Laboratories in Massachusetts als Lizenz eines Technologiezentrums an der Universität Konstanz vertreten.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

More than a cosmetic change. Von Alison Abbott in: Nature, Bd. 438, 10. Nov 2005, S. 144

To 3R is humane. Von Alan M. Goldberg und Paul A. Locke in: Environmental Forum, S. 19, Juli/August 2004

Animals and alternatives in testing: history, science, and ethics. Von J. Zurlo et al. Mary Ann Liebert, 1994

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/861617.

Streuen leicht gemacht

»Mit Hilfe der Streukarre kann eine Person verhältnismäßig große Flächen wie Betriebsgelände, Höfe usw. in kurzer Zeit vorschriftsmäßig bestreuen. Durch eine Öffnung vorn im Boden der Karre fließt das Streugut auf eine rotierende Scheibe, die von dem gummibereiften Laufrad angetrieben wird. Da sie als Schwungkraftscheibe wirkt, ist der leichte Lauf der Karre kaum beeinträchtigt. Breite und Dichte der Streuung regelt man mit dem an der Öffnung angebrachten Schieber sowie durch die Gehgeschwindigkeit. Bei einer mittleren Gangart wird etwa die Fahrbahn einer normalen Landstraße gründlich bestreut. Schmalen Wegen paßt man die Streuung durch entsprechend verminderte Geschwindigkeit an.« *Industrie-Anzeiger, 79. Jahrgang, Nr. 10, S. 8, Februar 1957*

◀ Wer streuen will, muss gehen.

Anti-Neutron entdeckt

»Ein weiteres Kernteilchen, das Anti-Neutron, ist von Forschern … entdeckt worden. Es ist wie das Neutron ungeladen, besitzt aber einen entgegengesetzten magnetischen Spin. Die Erzeugung dieses Teilchens gelingt durch Bombardierung flüssigen Wasserstoffs mit Anti-Protonen. Beim Zusammenprall von Neutronen und Anti-Neutronen tritt Zerstrahlung, das heißt Annihilation der Materie und Ausstrahlung der äquivalenten Energie, auf.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, Heft 2, S. 71, Februar 1957*

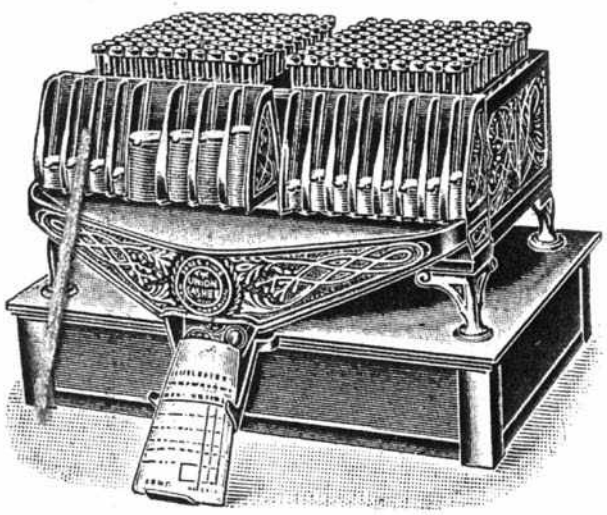
Telefonieren verboten

»In Jedda, Saudi-Arabien, wurde die Errichtung eines selbsttätigen Fernsprechamtes mit der Begründung verworfen, daß es damit jeder Frau möglich sein würde, mit jedem Mann außerhalb des Hauses zu sprechen. Deswegen werden auch keine Privatanschlüsse gestattet werden. Nur die Regierung, die Gesandtschaften und Handelshäuser werden Fernsprechanschluß erhalten.« *Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 9, Heft 2, S. 51, Februar 1957*

Lohn auf Tastendruck

»Eine Lohnauszahlungsmaschine … zahlt durch Drücken auf entsprechende Tasten jede Summe sofort aus resp. lässt das Geld in einen … Lohnbeutel fallen, so dass in wenigen Minuten die Arbeit von Stunden geleistet wird, und zwar mit viel grösserer Sicherheit, da an Stelle eines Verzählens ein Vergreifen von übersichtlich geordneten Tasten Platz greifen müsste, um Fehler zu begehen. … Die Maschine hat links und rechts auf einer oberen horizontalen Fläche je 100 Tasten für 1–100 Pfg. und 1–100 Mk. Vorne an der Maschine stehen aufrecht abnehmbare Rinnen, die vorne durch einen breiten Schlitz den Inhalt erkennen lassen …« *Bayerisches Industrie- und Gewerbeblatt, Nr. 11, S. 101, Februar 1907*

▼ Die Maschine zahlt Beträge genau aus.



Feucht statt heiß

»Die Erhaltung der ›richtigen‹ Feuchtigkeitsmenge in der Zimmerluft ist eine Forderung von gesundheitlicher und wirtschaftlicher Bedeutung. Manche Familie könnte einen Teil des Heizmaterials sparen, wenn darauf Bedacht genommen würde, dass die Luft immer feucht genug ist. Eine solche Zimmerluft erscheint bei einer Temperatur von 18° C wärmer und angenehmer, als eine Luft von der halben Feuchtigkeit bei einer Temperatur von 22 bis 23°. Daraus kann man den Schluss ziehen, dass es an dem Mangel von Feuchtigkeit liegt, wenn ein Raum von etwa 19° C gesunden Personen nicht warm genug ist.« *Deutsche Export-Revue, Nr. 21, S. 917, Februar 1907*

Leben Studenten ungesünder?

»Um den Einfluß des Studentenlebens, insbesondere des übermäßigen Biergenusses und des Verbindungslebens (Fechtübungen, Mensuren) auf das Herz festzustellen, hat Verfasser systematische Untersuchungen … angestellt. Es wurde besonders die Herzgröße … controlirt. Auf diese Weise wurde bei 20 jungen Leuten drei Semester hindurch das Herz überwacht. Es ließ sich dabei niemals … eine Veränderung der Herzsilhouette nachweisen. … Dagegen bleibt die Frage noch offen, ob derartig in der Jugend in Anspruch genommene Herzen im späteren Leben häufiger und früher insufficient werden als andere.« *Allgemeine Medicinische Central-Zeitung, 76. Jahrgang, Nr. 6, S. 86, Februar 1907*

ILLUSTRATION (FLUGGERÄT): DON FOLEY; EARTH SCIENCES AND IMAGE ANALYSIS LAB.; FOTO (ERDE): NASA, JSC

Ein zweistufiges Fluggerät für den Aufstieg in erdnahe Umlaufbahnen – hier ein Entwurf des militärischen Quicksat-Weltraumgefährts – könnte eines Tages Menschen und Nutzlasten eleganter ins All befördern als heutige Raketen. Angetrieben wird das Weltraumflugzeug durch Überschall-Verbrennungsstaustrahltriebwerke, kurz Scramjets.

Ein Flugzeug für den Weltraum

Mit einem neuartigen Düsenantrieb könnten Flugzeuge bis in den erdnahen Weltraum aufsteigen. Die Scramjet-Technik bietet eine kostengünstige Alternative zu Raketen und Spaceshuttles.

Von Thomas A. Jackson

Seit Langem träumen Ingenieure von einem Flugzeug, das von einer gewöhnlichen Piste startet, bis in den Weltraum aufsteigt und danach wieder normal landet – wie die wendigen Raumflitzer in den »Star Wars«-Filmen. Die Sache hat allerdings einen Haken: Düsenmaschinen sind auf Sauerstoff angewiesen, um ihren Treibstoff zu verbrennen, aber die obere Atmosphäre ist so sauerstoffarm, dass jede Flamme darin sofort erlischt. Darum beruht die Raumfahrt auf dem Raketenantrieb, bei dem der Flugkörper nicht nur Treibstoff, sondern auch Oxidationsmittel mitführt. Selbst das bislang fortschrittlichste System, der Spaceshuttle, schleppt fast die Hälfte seines Startgewichts in Form von flüssigem Sauerstoff und festem Oxidationsmittel mit, damit sein Raketentreibstoff während des gesamten Flugs zur Umlaufbahn brennen kann.

Eine günstigere Lösung verspricht der Scramjet (von englisch *supersonic combustion ramjet*, Überschall-Verbrennungsstaustrahltriebwerk), der während seines Steigflugs die durchquerte Luft aufnimmt. Da der Scramjet den Sauerstoff im Flug einfängt, statt ihn mitzuführen, spart er so viel Gewicht, dass jedes Kilogramm verbrauchten Treibstoffs rund viermal so viel Rückstoß liefert wie beim Raketenantrieb. Nach Jahrzehnten immer wieder unterbrochener Entwicklung scheinen brauchbare Scramjets kurz vor dem Start zu stehen. Entscheidende Bodentests kompletter Maschinen sind für 2007 und 2008 geplant, erste Flugversuche für 2009.

Anders als eine Rakete, die lotrecht zur Umlaufbahn emporschießt, erhebt sich ein Scramjet wie ein Flugzeug durch den von Tragflächen und Rumpf erzeugten aerodynamischen Auftrieb schräg aufwärts. Das macht die Maschine manövrierfähiger und sicherer; falls ein Flug abgebrochen werden muss, kann sie sanft zurück zur Erde gleiten. Für den Start und das Beschleunigen auf Überschallgeschwindigkeit – auf mehr als Mach 1 oder 1235 Kilometer pro Stunde – werden herkömmliche Strahltriebwerke verwendet. Dann übernehmen die Scramjets und dringen in den Hyperschallbereich oberhalb Mach 5 vor; erst bei Mach 15 stoßen sie an ihre theoretische Grenze. Schließlich beschleunigen kleine Raketenantriebe die Nutzlast auf dem letzten Stück bis zur Umlaufbahn. Mach 5 bedeutet fünffache Schallgeschwindigkeit oder 1,7 Kilometer pro Sekunde. Zum Vergleich: Das schnellste bemannte »luftatmende« Flugzeug, die nun ausgemusterte SR-71 Blackbird der US-Luftwaffe, erreichte maximal Mach 3,2.

Solche Fähigkeiten würden eine Revolution der Luft- und Raumfahrt bedeuten. Ein wiederverwendbares Raumfahrzeug, das wie ein herkömmliches Flugzeug starten und landen kann, macht den Transport von Mensch und Material in den Orbit fast zur Routine und senkt die Kosten dafür drastisch. Mit dem neuen Antrieb könnte ein militärisches Fluggerät Waffen wesentlich schneller, als dies heute möglich ist, zielgenau zu jedem Punkt der Erde bringen. Scramjets werden vielleicht eines Tages sogar Hyperschall-Verkehrsflugzeuge antreiben und den Langstreckenflug von New York nach Sidney (Australien) auf zwei Stunden verkürzen.

Anders als eine Rakete steigt ein Scramjet durch aerodynamischen Auftrieb schräg aufwärts

Viele Forschergruppen in aller Welt arbeiten derzeit an den gewaltigen technischen Problemen, die der Scramjet-Hyperschallflug mit sich bringt. Ich wer- ▷

▷ de mich auf das HyTech-Programm (kurz für *Hypersonic Technology*) der US-Luftwaffe und der Firma Pratt & Whitney konzentrieren, mit dem ich am besten vertraut bin. Andere Entwicklungen sind bei der US-Marine, der US-Luft- und Raumfahrtbehörde Nasa, der amerikanischen Militärforschungsbehörde Darpa *(Defense Advanced Research Project Agency)* und bei Ingenieurteams in Australien, Großbritannien, Japan und anderswo im Gange (siehe Tabelle S. 78).

Der Scramjet ist kein nagelneues Antriebskonzept. Erste Patente wurden schon in den 1950er Jahren vergeben, und Mitte der 1960er Jahre wurden mehrere Scramjets im Flug bei Geschwindigkeiten bis zu Mach 7,3 getestet. Die Firmen General Electric, United Technologies und Marquardt sowie Labors der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (US-Bundesstaat Maryland) und der Nasa bauten Maschinen, die als Treibstoff Wasserstoff verwendeten – wie die Spaceshuttles und andere Raketen. Mitte der 1980er Jahre initiierte die US-Regierung das National Aerospace Program für Scramjet-Antriebe. Doch nach einer Investition von fast zwei Milliarden Dollar wurde das Projekt 1994 eingestellt – zusammen mit anderen Budgetkürzungen am Ende des Kalten Kriegs. Im Jahr 2004 schloss die Nasa ihr HyperX-Programm ab, bei dem zwei wasserstoffgetriebene Scramjets jeweils wenige Sekunden lang erfolgreich geflogen waren. Ende 2004 stellte das Scramjet-Versuchsgerät X-43A mit Mach 9,6 einen Rekord auf (siehe Kasten S. 78/79). Derzeit versucht die US-Luftwaffe mit einer Scramjet-Technik der nächsten Generation ein Fluggerät auf unterschiedliche Geschwindigkeiten und Höhen zu bringen; dabei dient flüssiger Kohlenwasserstoff zugleich als Treibstoff und Kühlmittel.

Scramjets gehören zur Familie der luftatmenden Strahltriebwerke, die alle auf dem Rückstoßprinzip beruhen. Luft wird komprimiert, mit Treibstoff kombiniert, und das Gemisch wird verbrannt. Die expandierenden Verbrennungsprodukte treten nach hinten aus und erzeugen den Vorwärtsschub. Verkehrsflugzeuge verwenden Gasturbinen, die fünf Komponenten enthalten: den Lufteinlauf, den Kompressor – ein rotierendes Schaufelradsystem, das Luft ansaugt und verdichtet –, die Brennkammer, die Turbine, die durch die vorbeiströmenden Verbrennungsgase in Drehung versetzt wird und den Kompressor antreibt, und schließlich die Düse, in der die heißen Abgase expandieren und den Schub erzeugen. Moderne Turbojets können ein bisschen mehr als Mach 3 erreichen (siehe Kasten auf der Seite gegenüber). Bei höheren Geschwindigkeiten werden die rotierenden Komponenten durch Überhitzung beschädigt.

Wie manche Haifische muss das Triebwerk schnell unterwegs sein, um seinen Sauerstoffbedarf zu decken

Oberhalb Mach 2,5 braucht ein Strahltriebwerk weder Kompressor noch Turbine, falls es so konstruiert ist, dass die einlaufende Luft von selbst gestaut wird. Darum besteht ein Staustrahltriebwerk – ein Ramjet – nur aus Einlauf, Brennkammer und Düse. Der speziell konstruierte Einlauf verdichtet die Luft und verlangsamt sie zugleich auf Unterschallgeschwindigkeit. Injektoren fügen dem komprimierten Luftstrom Treibstoff hinzu, das Gemisch entzündet sich und verbrennt. Die heißen Abgase beschleunigen sich wieder auf Schallgeschwindigkeit, während sie eine Verengung oder eine mechanische Drossel passieren, und expandieren dann beim Verlassen der kegelförmigen Düse mit Überschallgeschwindigkeit. Wenn das Flugzeug Mach 5 überschreitet, steigt allerdings die Temperatur im Triebwerk durch das Abbremsen der einlaufenden Luft so sehr an, dass die Verbrennung kaum noch zusätzliche Wirkung zu entfalten vermag. Darum ist Mach 5 bis Mach 6 die praktische Grenze für Ramjets.

Um noch mehr Schub zu erzeugen und schneller zu fliegen als ein Ramjet, reduziert der Scramjet die anfängliche Kompression des Luftstroms, sodass dieser viel weniger verlangsamt wird; im Idealfall bleibt der Durchzug während des gesamten Verbrennungsvorgangs überschallschnell. Wie ein Ramjet setzt auch der Scramjet dem Luftstrom keine beweglichen Teile aus: Er besteht im Wesentlichen aus einer verengten Röhre, die zwei an ihren schmalen Enden verbundenen Trichtern gleicht. Beim Flug tritt Luft mit Überschalltempo in den Einlauftrichter ein; sie wird dadurch verdichtet und erwärmt. Im engen Mittelteil wird Treibstoff in den Luftstrom eingespritzt und entzündet, wodurch das Gas sich weiter erhitzt. Die Geschwindigkeit, mit der die dabei erzeugten Abgase aus der Düse – dem zweiten Trichter – schießen, ist höher als die Eintrittsgeschwindigkeit der Luft.

Ähnlich wie manche Haifische, die unentwegt vorwärtsschwimmen müssen, um ihren Sauerstoffbedarf zu decken, muss ein Ram- oder Scramjet bereits sehr schnell unterwegs sein, um die einlaufende Luft genügend stark zu komprimieren; erst dann kann er anspringen und Schub erzeugen. Eine Raumfähre mit Scramjet-Antrieb braucht daher einen fliegenden Start; ein zusätzliches Antriebssystem – eine Rakete oder Gasturbine – muss sie erst einmal in Fahrt bringen. Bei Erreichen der nötigen Geschwindigkeit aktiviert der Raumpilot den Scramjet für den Flug in die obere Atmosphäre; für den Eintritt in die Umlaufbahn sorgt schließlich eine Rakete. ▷

In Kürze

- **Speziell konstruierte Staustrahltriebwerke** können im Prinzip Sprengköpfe, Raumgleiter und sogar Passagierflugzeuge mit Mach 5 bis Mach 15 (fünf- bis fünfzehnfacher Schallgeschwindigkeit) antreiben.
- **Scramjets** mischen überschallschnell aufgenommene Luft mit Treibstoff und erzeugen bei dessen Verbrennung enormen Schub. Anders als Raketen sind sie nicht auf mitgeführten Sauerstoff und Oxidationsmittel angewiesen, sparen dadurch Gewicht und liefern bis zu viermal mehr Schub pro Treibstoffeinheit.
- Das Prinzip ist einfach, denn **Scramjets brauchen keine rotierenden Turbinen.** Dennoch stößt der Bau eines Hyperschalltriebwerks, das bei unterschiedlichen Flughöhen und Geschwindigkeiten funktioniert, auf große technische Schwierigkeiten.

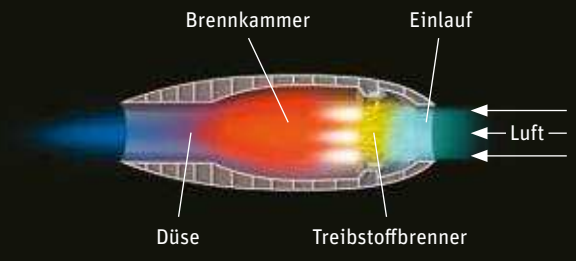
Die Familie der Strahltriebwerke

Scramjets sind eng mit anderen Düsenantrieben verwandt. Im Prinzip erzeugen sie allesamt Schub durch Verdichten einströmender Luft, Vermischen der Luft mit Treibstoff, Verbrennen des Gemischs und Expansion der Verbrennungsprodukte am Triebwerksausgang.

Scramjet (Mach 4,5 bis Mach 15)

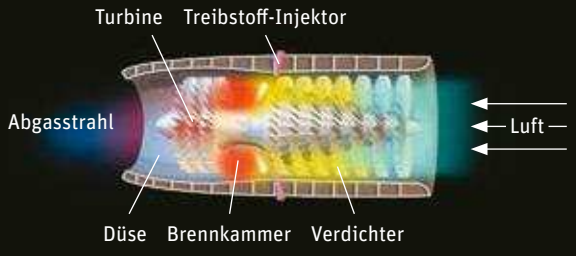
Überschallschnelle Luft dringt in den Einlauf und wird durch den verengten Strömungsweg ruckartig gestaut – verlangsamt und komprimiert –, wobei ihre Bewegungsenergie teilweise in Wärme übergeht. In der Brennkammer pumpen Injektoren Treibstoff in die heiße und dichte Luft. Das noch immer überschallschnelle Gemisch verbrennt rasant, und die chemische Energie des Treibstoffs verwandelt sich in Wärmeenergie. Der enge Strömungspfad hindert das heiße Gasgemisch daran, sich auszudehnen, und steigert den Druck noch mehr. Erst wenn die hochgespannten Abgase die Düse erreichen, können sie expandieren und nach außen beschleunigen. Dabei verwandelt sich ihre thermische Energie in Bewegungsenergie und erzeugt gewaltigen Schub.

Ramjet (Mach 2,5 bis Mach 5 oder 6)



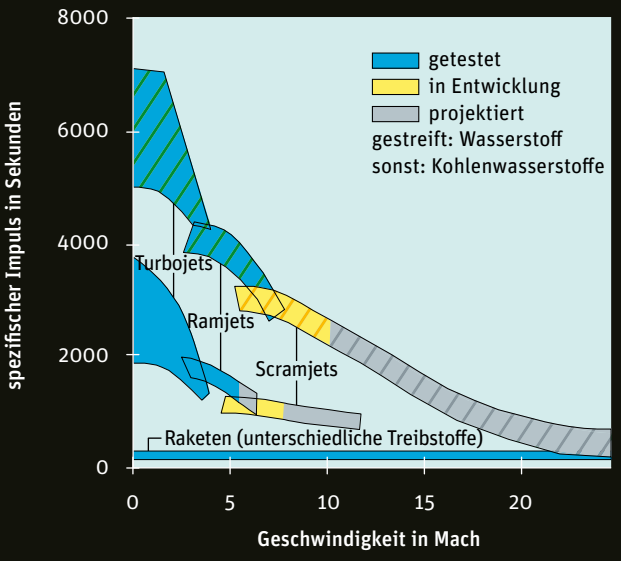
Das Ramjet-Funktionsprinzip ähnelt dem eines Scramjets, doch bleibt der innere Luftstrom im Unterschallbereich.

Turbojet (Mach 0 bis Mach 3)



Wegen der geringeren Fluggeschwindigkeit braucht der Turbojet rotierende Turbinen, um die einströmende Luft zu komprimieren und den Schub zu erzeugen.

Leistungsbereiche



Jeder Triebwerkstyp eignet sich besonders für eine bestimmte Kombination von Flughöhe und Geschwindigkeit. Wasserstoff bietet zwar bessere Triebwerksleistung, lässt sich aber nur schwer auf kleinem Raum unterbringen und nicht nach Belieben auftanken. Kohlenwasserstoffe sind einfacher zu behandeln, liefern aber weniger Energie pro Gewichtseinheit. Der spezifische Impuls, ein Maß für die relative Triebwerkseffizienz, ist hier definiert als Düsenschub pro Einheit der Treibstoff-Durchflussgeschwindigkeit, multipliziert mit der Betriebsdauer des Antriebs.

ILLUSTRATIONEN: DON FOLEY; DIAGRAMM: LUCY READING-IKKANDA

▷ Die Konstruktion eines Antriebssystems, das die verschiedenen Phasen vereinigt, ist ein Optimierungsproblem, das von mehreren Faktoren abhängt: Größe der Nutzlast, Höhe der Umlaufbahn, Reichweite und Geschwindigkeit während des luftatmenden Antriebs sowie eventuell der Fähigkeit, Waffen zu tragen.

Die Hauptschwierigkeit ist, dass die Luft in wenigen tausendstel Sekunden die gesamte Maschine durchquert. Darum gleicht die Aufgabe, den Treibstoff zu verbrennen, dem Versuch, ein Streichholz in einem Tornado zu entzünden. Die Innenseite des Rohrs muss äußerst raffiniert geformt werden, damit die Verbrennungswärme an der richtigen Stelle frei wird. Stabiler Schub kommt nur zu Stande, wenn Tempo und Druck des durch die Maschine rasenden Luftstroms präzise gesteuert werden; zugleich muss gerade so viel Treibstoff in die Brennkammer gespeist werden, dass er vollständig verbrennt und seine Energie exakt nach Wunsch freisetzt. Wird das Verhältnis zwischen Strömungsquerschnitt und Wärmeentwicklung sorgsam kontrolliert, so entfällt die Notwendigkeit, eine mechanische Drosselung einzubauen wie beim Ramjet, und der Scramjet kann einen überschallschnellen Strom durch die Brennkammer aufrechterhalten.

Treibstoff als Kühlmittel

Die Forscher wissen, dass es vor allem darum geht, die Wärmeenergie in der Maschine genau zu beherrschen. Die durch Reibung und Verbrennungsprozess erzeugte Wärme breitet sich im Flugkörper aus; interne Stoßwellen, die gegen die Antriebswand schlagen, können diesen Wärmefluss örtlich enorm verstärken. Wird die Bewegungsenergie des einlaufenden Hyperschall-Luftstroms komplett in Wärmeenergie verwandelt, droht das Metallgefüge zu schmelzen. Doch ohne ausreichende Bremsung jagt die Luft zu schnell durch die Maschine, und Temperatur und Druck reichen nicht aus, um den Treibstoff zu entflammen.

Damit die Maschine beim Überschallflug nicht auf Grund der Luftreibung schmilzt, verwenden die Ingenieure das Prinzip der »aktiven Kühlung«. Pumpen erzeugen einen konstanten Fluss von Wärme absorbierendem Treibstoff durch Kanäle in Antrieb und Hülle, um die gefährliche Wärme abzuführen. Als angenehmer Nebeneffekt wirkt sich aus, dass der Treibstoff für die schnelle Verbrennung im Antrieb vorbereitet wird. Diese Kühltechnik wird seit Jahrzehnten erfolgreich bei konventionellen Raketen angewendet, meist mit Wasserstoff als Kühlmittel. Ein Kohlenwasserstoff, wie er in Scramjets als Treibstoff dient, eignet sich dafür weniger, weil er sich in der Hitze leicht zu festem Koks zersetzt und die Kühlkanäle blockiert. Nachteilig ist auch, dass aktiv kühlende Systeme mehr Gewicht und Kompliziertheit bedeuten; sie dürfen niemals ausfallen, denn ohne den als Kühlmittel zirkulierenden Treibstoff droht eine Katastrophe.

Das Betreiben eines Scramjets gleicht darum einer Gratwanderung – noch zusätzlich erschwert durch die Tatsache, dass eine bestimmte Geometrie des Luftstroms nur für eine einzige Kombination der Flugbedingungen wie Geschwindigkeit, Höhe und so weiter optimal ist. Im Idealfall müssten sich die physikalischen Maße und die Form des Strömungswegs ständig anpassen, während das Flugzeug

Einige Scramjet-Entwicklungsprogramme

Neben den im Artikel beschriebenen HyTech-Testprogrammen der US-Luftwaffe arbeiten weitere nationale und internationale Forschergruppen an der Scramjet-Technik. Hier eine Auswahl laufender oder kürzlich abgeschlossener Programme:

Programm	Zeit	Institution	Erfolge und Ziele
Hyper-X	1996 bis 2004	Nasa	X-43A, ein kleiner Testflugkörper mit Wasserstoffantrieb, erreichte einmal fast Mach 10.
HyShot	seit 2001	Universität von Queensland (Australien) mit australischen, britischen, amerikanischen, deutschen, südkoreanischen und japanischen Partnern	Im Juli 2002 führte das HyShot-Team den allerersten erfolgreichen Testflug eines Scramjets durch. Im Sturzflug erreichte er sechs Sekunden lang Mach 7,6.
Hypersonic Flight Demonstration (HyFly)	seit 2002	US-Militärforschungsbehörden Darpa *(Defense Advanced Research Project Agency)* und ONR *(Office of Naval Research)*	Das HyFly-Programm baut eine Cruise Missile mit Ramjet/Scramjet-Antrieb für über Mach 6. Das Applied Physics Laboratory der Johns-Hopkins-Universität entwickelte das Triebwerk.
Freeflight Atmospheric Scramjet Test Technique (FASST)	seit 2003	Alliant Techsystems, unterstützt von Darpa und ONR	Am 10. Dezember 2005 erreichte der mit Kerosin betriebene Scramjet bei einem 15-Sekunden-Flug Mach 5,5.
Falcon	seit 2003	Darpa	Ziel des Falcon-Programms ist ein unbemannter Hyperschall-Flugkörper, der binnen zwei Stunden jeden Punkt des Erdballs zu erreichen vermag. Trotz zunächst rein militärischer Absichten könnte ein solches Gerät auch als Sprungbrett in den Weltraum dienen, wenn daraus ein Flugzeug für stufenlosen Aufstieg in die Erdumlaufbahn entwickelt würde.

beschleunigt und Höhe gewinnt – aber bewegliche, hitzebeständige Innenwände und Gelenke stellen Ansprüche, die heutige Materialien nicht erfüllen. Da es nicht gelingt, sehr heiße Innenflächen der Maschine immerfort zu bewegen und Kanäle gegen das Eindringen heißer Abgase abzudichten, lässt sich der Antrieb bis auf Weiteres nicht vom Start bis zur Landung optimal nutzen.

Trotz all dieser technischen Hürden haben die Forscher kürzlich einige viel versprechende Erfolge erzielt. Ein Beispiel bietet das seit 1995 laufende HyTech-Programm der US-Luftwaffe. Diese Zusammenarbeit von Regierung, Industrie sowie Wissenschaftlern und Ingenieuren aus dem Universitätsbereich konzentrierte sich auf einen Teilaspekt der technischen Probleme, den das Team für lösbar hielt. Zunächst erprobte man kleine Wegwerf-Scramjets, wie sie etwa für militärische Flugkörper dienen. Die Maschine war so klein, dass sie in vorhandene Bodentestanlagen passte; das erleichterte die technische Bewertung. Sie musste nur ein einziges Mal funktionieren; die komplizierte Aufgabe, wiederverwendbare Flugkörper zu entwickeln, wurde auf später verschoben. Durch Beschränkung auf einen Betriebsbereich zwischen Mach 4 und Mach 8 sowie einen Strömungspfad mit fester Geometrie sorgte das Programm für möglichst einfache Konstruktion.

Schließlich beschloss das Team, für HyTech den Düsentreibstoff JP-7 zu benutzen, einen flüssigen Kohlenwasserstoff, der ursprünglich für die SR-71 Blackbird entwickelt worden war. Wie erwähnt dient der Treibstoff zugleich als Kühlmittel zum Beherrschen der Überschusswärme. In einem thermisch ausbalancierten System sollte die zum Absorbieren überschüssiger Wärme nötige Treibstoffmenge nicht größer sein als der Treibstoffbedarf für die Verbrennung. Die HyTech-Planer wollen, dass diese Balance bei Mach 8 eintritt, und JP-7 erwies sich als dafür gut geeignet.

Zunächst erprobte man kleine Wegwerf-Triebwerke, wie sie etwa für militärische Flugkörper dienen

Damit ein luftatmender Antrieb mit seinem Wirkungsgrad gegen eine raketengetriebene Raumfähre zu bestehen vermag, muss er oberhalb seiner halben Maximalgeschwindigkeit betrieben werden. Darum strebten die Techniker für den Scramjet eine Anfangsgeschwindigkeit von Mach 4 an; das ist schwer zu erreichen, denn bei dieser Geschwindigkeit reicht die Lufttemperatur beim Eintritt in die Brennkammer noch bei Weitem nicht zur Selbstentzündung des Treibstoffs aus. Die Maschine braucht also eine Zündhilfe – etwa einen chemischen Zusatz zur Senkung der Selbstzündungstemperatur des Treibstoffs oder einen Apparat, der den Treibstoff in Brand setzt, indem er ein sehr heißes Gas erzeugt und ins Treibstoff-Luft-Gemisch injiziert. Bei höheren Mach-Zahlen ist das Zünden und Stabilisieren der Flamme viel leichter, bis bei sehr hohen ▷

Alle Scramjets müssen zunächst durch Hilfsraketen auf die erforderliche Zündgeschwindigkeit gebracht werden. Der Forschungs-Scramjet X-43A der Nasa (unten) hält seit 16. November 2004 den Geschwindigkeitsrekord für einen luftatmenden Flugkörper mit Mach 9,6 – fast 12 000 Kilometer pro Stunde. Den Anfangsschub lieferte eine Startrakete vom Typ Orbital-Sciences-Pegasus. Die kleineren australischen HyShot-Prototypen starteten huckepack auf Terrier-Orion-Raketen (unten rechts). Das Bild rechts zeigt den FASST-Scramjet als Triebwerk eines künftigen militärischen Flugkörpers.

ATK.COM

LINKS (X-43A): NASA, DFRC; RECHTS (HYSHOT): CHRIS STACEY, UNIVERSITY OF QUEENSLAND

ILLUSTRATION (X-51A): DON FOLEY; FOTO RECHTS: NASA, LRC, PAUL BAGBY

▷ Fluggeschwindigkeiten die kurze Aufenthaltszeit in der Maschine ein stabiles Verbrennen wiederum erschwert.

Bis 2003 entwickelte das HyTech-Team Antriebskomponenten und integrierte Subsysteme, welche die meisten der ursprünglichen Programmziele erreichten oder sogar übertrafen. Doch selbst nach ausgiebigen Bodentests bleibt vieles ungewiss. Die Fragezeichen betreffen das Verhalten unter wechselnden Bedingungen wie Geschwindigkeit, Höhe und Drosseleinstellung; sie lassen sich im Windkanal nur äußerst schwer untersuchen und sollten darum am besten bei Testflügen erforscht werden.

Deshalb wird die Scramjet Engine Demonstration (SED) der US-Luftwaffe, jetzt X-51A genannt, im Jahr 2009 einige HyTech-Systeme in der Luft erproben (siehe Bild auf dieser Seite). Durch Bodentests und Computeranalysen haben die HyTech-Ingenieure für das SED-Programm einen flugtauglichen, aktiv gekühlten Scramjet entwickelt.

Da es derzeit nicht gelingt, die innere Form der Maschine im Flug an rasch wechselnde Geschwindigkeiten und Höhen anzupassen, baute das SED-Team einen Strömungspfad mit fester Geometrie. Er ist ein Kompromiss zwischen angemessener Beschleunigung im unteren Geschwindigkeitsbereich – Mach 4,5 bis Mach 7 – und guter Flugleistung bei der Höchstgeschwindigkeit von Mach 7. Somit bleibt die richtige Verteilung des Treibstoffs innerhalb des Antriebs das wichtigste Mittel zur Steuerung von Schub und Beschleunigung sowie für stabilen Betrieb.

Die Maschine besteht hauptsächlich aus Stahl, der durch internen Treibstofffluss aktiv gekühlt wird. Zusätzlich schützen hitzebeständige Keramikkomponenten die Vorderkanten, die dem heißen Luftstrom direkt ausgesetzt sind und für den Einbau von Kühlkanälen zu wenig Platz bieten. Die gekühlten und ungekühlten Teile zuverlässig zu verbinden ist schwierig, aber entscheidend. Natürlich würde der strukturelle Zusammenbruch eines militärischen Flugkörpers vor Erreichen seines Ziels völliges Versagen bedeuten. Die unterschiedliche Wärmeausdehnung der Keramik- und Metallkomponenten schafft ein weiteres Problem: Sie droht die Geometrie des Luftstroms zu verzerren und gefährdet dadurch jeden Versuch, den Scramjet-Betrieb zu steuern. Die Ingenieure lösten das Problem durch Plättchen aus hitzebeständigem Kohlenstoff-Verbundmaterial mit Steckverbindungen, wie sie als »Nut und Feder« beim Verlegen von Holzböden bekannt sind.

Die Verwendung von JP-7 als Treibstoff und Kühlmittel ist für den Erfolg der X-51A entscheidend. Bis jetzt wird in den meisten Scramjet-Programmen Wasserstoff eingesetzt. Ihm gegenüber sind die meisten Kohlenwasserstoffe zwar weniger reaktionsfreudig, enthalten weniger Energie pro Gewichtseinheit und haben weniger Wärmekapazität, um heiße Strukturen zu kühlen. Doch dafür werden Kohlenwasserstoffe in praktisch allen Flugzeugen der Luftwaffe verwendet; darum gibt es bereits eine weltweite Infrastruktur für die Verteilung und den Umgang mit diesem Treibstoff. Außerdem lässt er sich besser aufbewahren; da in ihm mehr Energie pro Volumeneinheit steckt, braucht er weniger Raum an Bord als die gleiche Energiemenge in Form von Wasserstoff.

Um die geringere Reaktionsfreude und Wärmekapazität von Kohlenwasserstoff-Treibstoff auszugleichen, nutzt HyTech das endothermische Potenzial von JP-7 – das heißt seine Fähigkeit, Wärme chemisch aufzusaugen. Wenn solche Treibstoffe aus ihrer Umgebung bei Abwesenheit von Sauerstoff und in Gegenwart eines passenden Katalysators Wärme aufnehmen, zerfallen ihre langen, komplexen Polymerketten in kurze, einfache Verbindungen. Dabei absorbiert der Treibstoff bis zum Fünffachen seiner Wärmekapazität – das heißt der Energie, die zum bloßen Erwärmen der Flüssigkeit erforderlich ist. Obendrein wird der Treibstoff nach der endothermen Erwärmung ein heißes Gas, das zehn Prozent mehr Energie enthält, als die chemische Energie des unerwärmten flüssigen Treibstoffs ausmacht. Und schließlich sind die entstehenden Kohlenwasserstoffe mit geringem Molekulargewicht reaktionsfreudiger als ihre Vorgänger, die langen Treibstoffmoleküle; darum sind sie in der knappen Zeit, die der Treibstoff im Scramjet verbringt, leichter zu verbrennen.

Bis zu bemannten Hyperschallflügen und Routinefahrten zum erdnahen Weltraum bleibt noch viel zu tun

Die Ingenieure haben bereits eine genügend große Maschine mit fester Geometrie hergestellt, um einen Flugkörper anzutreiben, der mit Kohlenwasserstoff – beispielsweise JP-7 – bei Mach 4,5 zündet und dann bis auf Mach 7 beschleunigt. Verfügbar sind auch aktive Kühlung und temperaturresistente Bauweisen, mit denen die Maschine während der Brenndauer thermisch stabil bleibt. Im Jahr 2009 wird das Flugzeug X-51A mit einer Rakete auf das Anfangstempo des Scramjets getrieben und dann abgekoppelt werden – in der Hoffnung, dass die heikle Technik sich im Freiflug bewährt. Selbst wenn die SED-Flugtests erfolgreich verlaufen, bleibt viel zu tun, bevor Waffen für schnelle Gegenschläge sowie Hyperschall-Flugverkehr und billigerer Zugang zum erdnahen Weltraum verwirklicht werden können.

Scramjets müssen über einen großen Mach-Bereich zuverlässig funktionieren. Wie erwähnt sind gängige Gasturbinen von Mach 0 bis Mach 3 oder 4 brauchbar, während Raketen oberhalb Mach 15 konkurrenzlos bleiben. Bei solch hohen Geschwindigkeiten wird für Scramjets in Höhen, die noch genügend Luft für die

Der X-51A Scramjet Engine Demonstrator (links) soll 2009 im Rahmen des HyTech-Programms der US-Luftwaffe im Flug getestet werden. Der neueste Prototyp der Luftwaffe (rechts) bestand kürzlich eine Serie von Bodentests im Hyperschall-Windkanal am Langley-Forschungszentrum der Nasa. Die Techniker drehten den Prototyp mit der Unterseite nach oben, um Rohrleitungen und Kabel durch den unteren Sockel führen zu können.

Treibstoffverbrennung bieten, die Erwärmung unerträglich.

Gebraucht werden Scramjets, die möglichst viel von der Lücke zwischen Mach 4 und Mach 15 ausfüllen. Für manche Zwecke wird der Scramjet eng mit einem langsameren Antrieb wie der Gasturbine kombiniert werden müssen. Das heißt, die Betriebsbereiche der Maschinen müssen sich überschneiden, um einen glatten Übergang zu ermöglichen. Dabei darf die zusätzliche Masse der verschiedenen Antriebssysteme den Flugkörper nicht überladen, und zugleich muss der Antriebswechsel fein abgestimmt verlaufen.

Dorniger Weg zum bemannten Raumgleiter

Die X-51A mit ihrer unveränderlichen Geometrie kann ihre Betriebsgrenze nicht nennenswert absenken. Ohne variable Geometrie sind Scramjets unterhalb Mach 4 flugunfähig. Ingenieure von US-Luftwaffe und Nasa haben eine HyTech-Maschine mit dem Prototyp eines verstellbaren Lufteinlaufs versehen, bei dem bewegliche Klappen die aerodynamische Wirkung verändern.

Auch die Treibstofftechnik dürfte den Nutzen des Scramjets an beiden Enden des gegenwärtigen Einsatzrahmens einschränken. Die X-51A funktioniert nur, wenn der JP-7-Treibstoff durch ausreichende Erwärmung des Flugkörpers gasförmig wird. Bei niedrigeren Mach-Zahlen werden künftige Brennkammern vielleicht kurz mit Flüssigtreibstoff – oder einem Gemisch von Flüssigkeit und Gas – laufen müssen, bevor in einer späteren Flugphase reiner Gastreibstoff den Betrieb übernimmt.

Da Flüssigkeiten tausendmal dichter sind als Gase, wird es extrem heikel sein, die Verbrennung während des Übergangs von Flüssig- zu Gastreibstoff stabil zu halten. Dass dies gelingen kann, haben Komponententests im Rahmen der HyTech-Forschung bereits gezeigt.

An der Hochgeschwindigkeitsgrenze wird die Wärmekapazität von Flugzeugtreibstoffen, selbst wenn sie sich wie JP-7 endothermisch aufspalten lassen, bei Annäherung an Mach 8 immer weniger ausreichen. Noch schnellere Flüge werden völlig andere Treibstoffe und neuartige Hitzeschutzmaterialien erfordern – oder vielleicht den Einsatz von Wasserstoff, trotz seiner Nachteile bei Speichern und Tanken.

Das HyTech-Programm konzentrierte sich anfangs auf unbemannte Flugkörper, die von Flugzeugen starten. Für Hyperschall-Langstreckenflüge und für Raumfähren werden viel größere Maschinen gebraucht. Seit 2003 ringen das Falcon-Programm der Militärforschungsbehörde Darpa sowie das Robust-Scramjet-Programm der Luftwaffe mit den dadurch entstehenden Problemen; die Luftstromkapazitäten sollen hundertmal so groß werden wie bei den gegenwärtigen HyTech-Geräten.

Die Scramjet-Technik hat in den letzten Jahren auf dem Weg zum ausgedehnten Hochgeschwindigkeitsflug manche Hürde überwunden. Wenn das so weitergeht, hoffen wir, wenn auch nicht mit Riesensprüngen, so doch Schritt für Schritt in nicht allzu ferner Zukunft etwas zu bauen, dass einem Raumflitzer aus »Star Wars« ähnelt. ◁

Thomas A. Jackson ist leitender Wissenschaftler an der Aerospace Propulsion Division des Forschungslabors der US-Luftwaffe in Ohio. Er promovierte 1985 in Maschinenbau an der Universität von Kalifornien in Irvine und erwarb später am Massachusetts Institute of Technology ein Management-Diplom.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Scramjet engines: the first forty years. Von E. T. Curran in: Journal of Propulsion and Power, Bd. 17, S. 1138, 2001

Fluid phenomena in scramjet combustion systems. Von E. T. Curran et al. in: Annual Review of Fluid Mechanics, Bd. 28, S. 323, 1996

Supersonic combustion ramjet missile. Von F. S. Billig in: Journal of Propulsion and Power, Bd. 11, S. 1139, 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/860731.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Ein echter
Hingucker ...

... ist die **Armbanduhr »Samui Moon«** mit ihrer binären blauen LED-Zeitanzeige, die Ihnen auf Knopfdruck die Zeit anzeigt. Die erste Zeile gibt dabei die Stunden an und die zweite Zeile die Minuten. Edelstahlgehäuse (Durchmesser: ca. 4 cm) mit Lederarmband, wasserdicht bis 3 ATM. Die Uhr hat 2 Jahre Garantie und kostet € 89,– zzgl. Porto. Diese und weitere Geschenkideen – wie z. B. den »Rubik's Cube« im Spektrum-Design oder unsere T-Shirts mit wissenschaftlichen Motiven – finden Sie unter

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Leserservice | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg
Tel.: 06221 9126-743 | Fax: 06221 9126-751
service@spektrum.com

KLAUS TSCHIRA STIFTUNG

Jugendsoftwarepreis für didaktische Leistungen

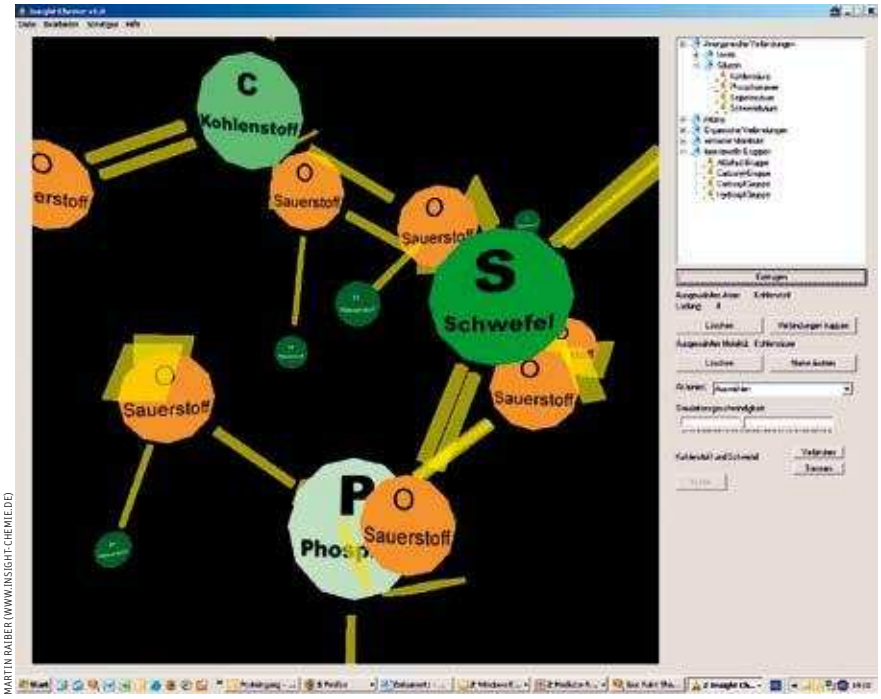
Die anschauliche Vermittlung von Naturwissenschaften ist einen Preis wert – erst recht, wenn eine ganze Menge Programmierarbeit dahintersteckt.

Von Emanuela Buyer

Wer kennt am besten die Stolpersteine auf dem Weg zum Verständnis eines naturwissenschaftlichen Sachverhalts? Derjenige, der sie soeben mühsam überwunden hat. Und programmieren können die Schüler sowieso meistens besser als ihre Lehrer. Grund genug für die Klaus Tschira Stiftung, ausdrücklich für Jugendliche einen Preis für die Lösung einer doppelten Aufgabe auszuschreiben: ein Thema didaktisch aufzubereiten und es auf den Computer zu bringen.

»Insight Chemie«, das preisgekrönte interaktive Molekülsimulationsprogramm von Martin Raiber, soll die klassischen Steckmodelle aus dem Chemieunterricht überflüssig machen.

Zu Beginn der Preisverleihung am 13. November 2006 in Heidelberg zieht der Kriminalbiologe Mark Benecke in einem mitreißenden und nicht ganz leichenfreien Vortrag sehr anschaulich Parallelen zwischen Naturwissenschaften und Forensik. Wer Erfolg haben will, muss scheinbar offensichtliche Tatsachen und als selbstverständlich angesehene Zusammenhänge hinterfragen; darauf folgt dann die genaue methodische Untersuchung der Umstände. Das gilt auch für den Mordfall, den Benecke als Beispiel anführt: Da hatte er nicht nur kleinste Hinweise wie Larven und Raupen auf dem Körper der Toten zu untersuchen, sondern auch Versuche mit Tierkadavern anzustellen. Sehr wissenschaftlich, sehr faszinierend – aber ich bin sicher, die Anwesenden würden sämtlich lieber stundenlang daheim vor dem Computer sitzen und programmieren.



MARTIN RAIBER (WWW.INSIGHT-CHEMIE.DE)

Preise werden in vier verschiedenen Altersklassen und in zwei Kategorien vergeben: für eine interaktive Internetseite zu einem naturwissenschaftlichen Thema und für eine Lernsoftware, die komplizierte Sachverhalte vermittelt.

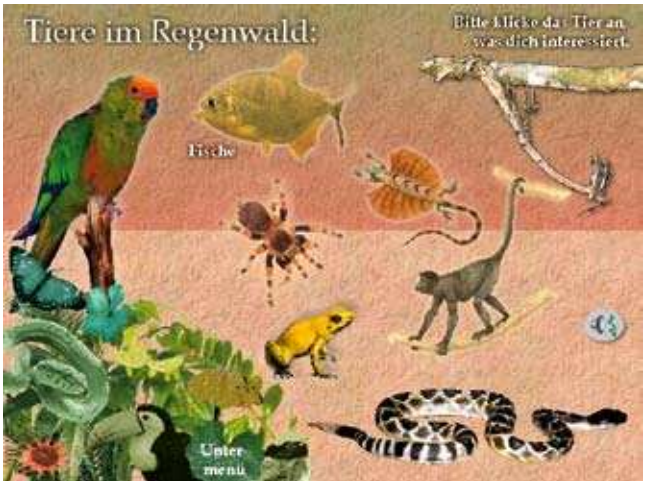
In der zweiten Kategorie vergibt die Stiftung, wohl wegen der erhöhten Anforderungen an die Programmierfähigkeiten der Schüler, nur Preise in der Sekundarstufe II, davon aber diesmal gleich die doppelte Menge, da sich die Jury zwischen zwei der Einsendungen nicht entscheiden konnte. Zufällig haben die gleichrangigen Finalisten auch noch aus demselben Themenbereich geschöpft: chemische Verbindungen.

Mit der von Andreas Prams vom Carl-Orff-Gymnasium in Unterschleißheim (Bayern) entwickelten Lernsoftware kann der Benutzer selbstständig komplizierte chemische Verbindungen zusammenbauen und sie reagieren lassen. Als Grundbausteine stehen vier verschiedene Moleküle zur Auswahl.

Durch die dreidimensionale Grafik bekommt der Benutzer eine Vorstellung von der räumlichen Struktur der Verbindungen. Dabei kann er die Gebilde aus Kugeln und Stäbchen auch heranzoomen, drehen und verschieben. Hinter dem Programm steckt die VB-*(valence bond)*-Methode, ein Näherungsverfahren, mit dem Chemiker berechnen, wie sich die Atome eines Moleküls im Raum ausrichten, um

wis
wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de



DANIEL BECKER, FELICITAS UND NIKLAS FASEL, EVELYN GRASSHOFF, JAN PFÖRTNER, JANA SCHMITZ

KLAUS TSCHIRA STIFTUNG

»Rettet den Regenwald«, das Multimedia-Projekt von sechs Schülern aus der Gesamtschule Wulfen, errang den Preis in der Kategorie 5. bis 7. Klasse.

die Konfiguration minimaler Energie anzunehmen.

Didaktisch wirkt das Programm vor allem dadurch, dass es den Chemie-Interessierten ermöglicht, mit dreidimensionalen Molekülen herumzuspielen, sie zu drehen und zu strecken, wobei sich das Molekül trotz allem immer wieder den Naturgesetzen entsprechend ausrichtet. Auf diese Weise wird anschaulich, was sich der Nichtchemiker sonst wohl nur schwer vorstellen kann.

Virtueller Molekülbaukasten

Martin Raiber vom Helfenstein-Gymnasium in Geislingen an der Steige (Schwäbische Alb) konzentrierte sich in seiner Arbeit auf die große Vielfalt der Moleküle und ermöglicht dem Benutzer, die Systematik chemischer Verbindungen zu begreifen. Dazu wählt dieser verschiedene Elemente aus dem Periodensystem, bestimmt die gewünschte Bindungsart und konstruiert so eigene Moleküle. Dabei merkt er nicht nur schnell, was funktioniert und was nicht; der Baukasten motiviert auch dazu, die Gesetzmäßigkeiten verstehen zu wollen. Warum geht ein Kohlenstoffatom mit zwei Sauerstoffatomen eine Bindung ein, nicht jedoch mit dreien?

So führt das Programm die Schüler geradezu spielerisch an die Gesetze der Chemie heran. Auch hier sieht der Nutzer die Moleküle in drei Dimensionen und kann sie um ihre Achsen rotieren lassen sowie sie aus der Nähe betrachten.

Auch das Programm Daniel Autenrieths vom Enztal-Gymnasium in Bad Wildbad (Baden-Württemberg) kommt aus der Chemie. In einem interaktiven virtuellen Labor kann der Interessierte, vom Massenerhaltungssatz und Daltons Gesetz der konstanten Proportionen geleitet, Elemente miteinander reagieren lassen und in Übungen beispielsweise die geforderten Stoffmengen oder Massen berechnen. Er bekommt außerdem eine Einführung in das Atommodell des Chemikers.

Dabei setzt das Programm dem Nutzer zunächst häppchenweise Theorie vor, die er dann sogleich in Übungen in die Praxis umsetzen kann. Ein zusätzliches Video eines Versuchs zur Veranschaulichung der Massenerhaltung zeigt die Reaktion von Kupfer und Schwefel zu Kupfersulfid. Darin wiegt ein Experimentator zunächst die Ausgangsstoffe, bringt sie zur Reaktion und stellt dann fest, dass sich dabei die Gesamtmasse nicht verändert hat. Mit diesem virtuellen Heimlabor gewann Daniel Autenrieth den ersten Preis der Altersstufe 8. bis 10. Klasse.

Den ersten Preis für ein interaktives Multimediaprogramm der Sekundarstufe II ergatterte Johannes Ewald vom Jakob-Bruckner-Gymnasium in Kaufbeuren (Bayern) mit dem Thema Kombinatorik. Bei ihm können die Schüler mit Urnen und Fahrradschlössern ausprobieren, was für ein Unterschied zwischen Ziehen mit und ohne Zurücklegen besteht und wie viele Möglichkeiten es gibt, Besteck auf dem Tisch anzuordnen. »Ich wollte Schülern etwas so beibringen, dass sie es auch verstehen«, erklärt er seine Motivation, das Projekt anzugehen, »also ohne mit Fachbegriffen und Spezialwörtern um mich zu schmeißen.«

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung gibt immer wieder Anlass zum Staunen. Wie viele Möglichkeiten gibt es, 8 Orden auf 12 Mann zu verteilen, wenn 4 an die erste Kompanie mit 6 Soldaten, 3 an die zweite mit 4 und einer an die dritte mit 2 Soldaten gehen soll? Es sind unglaubliche 29 393 280!

Das Programm führt den lerneifrigen Nutzer Schritt für Schritt an das häufig gefürchtete Gebiet der Mathematik heran. Nach einer Einführung in die theoretischen Hintergründe legt Johannes Ewald anhand von Beispielen sehr detailliert und verständlich die Methoden zur Berechnung dar. Hat der Lernende die Theorie verstanden, darf er selbst einige Aufgaben lösen.

Und nicht nur der Inhalt überzeugt die Jury: »Professionell gestaltet, toll gemacht!«, begeistert Rainer Malaka, Professor für Mathematik und Informatik an der Universität Bremen, der für die Stiftung die Preise verleiht, sich für das Layout des Programms.

»Da können sie rumspielen und Aufgaben lösen«

Auch die jüngeren Schüler leisteten Erstaunliches. Einige Fünft- bis Siebtklässler der Gesamtschule Wulfen (Nordrhein-Westfalen) haben gemeinsam eine umfangreiche Internetseite mit dem Namen »Rettet den Regenwald« gebastelt (Bild oben). Sehr stimmungsvoll erklingen schon in der Eröffnung das Vogelgezwitscher und die Regentropfen, die auf das grüne Blätterdach fallen. Auch das ▷

Die Affen toben durch den Dschungel, um die Grund- und Vorschüler das kleine Einmaleins zu lehren: ein Sonderpreis für die Schüler aus Steyr (Oberösterreich).

Menü zeugt von Einfallsreichtum: Navigiert wird mit einer Anzahl von Tieren, die Felicitas Fasel, mit elf Jahren die Jüngste der Truppe, aus Katalogen eingescannt hat.

Die Idee für das Projekt hatten die Lehrerin Sylke Wedekind-Otto und Sabine Bornemann, eine engagierte Mutter und Medienpädagogin. Die beiden leiten jedes Jahr eine Arbeitsgemeinschaft, an der sich besonders begabte Schüler beteiligen können. Diesmal bekam jeder der sechs jungen Programmierer seinen eigenen Themenbereich, für den er eigenständig Material beschaffte und mit ein wenig Hilfe die Seiten bastelte. Das Thema wählte die Gruppe so, dass es den Lehrplan ergänzt. Schließlich soll das Programm auch von anderen Klassen im regulären Unterricht genutzt werden. Sabine Bornemann ist ganz begeistert von den Möglichkeiten, die der Computer eröffnet: »Das macht den Kindern Spaß«, erklärt sie, »da bewegt sich etwas, und da können sie rumspielen und Aufgaben lösen.«

Die übliche Hoffnung, dass eine Preisvergabe die Geehrten zu einer Fortführung ihrer Aktivitäten ermuntert, hat sich zumindest in einem Fall erfüllt. Der erste Platz im Jahr 2005 motivierte Alexander und Ingmar Koch, Maximilian Schmidtke und Kolja Schleich vom Hölderlin-Gymnasium in Heidelberg so sehr, dass sie ihr Projekt zu einer beinahe schon professionellen Lernsoftware weiterentwickelten. Das Programm widmeten sie dem Lehrer, der sie bei der Arbeit unterstützt hatte und kurz vor der Preisvergabe gestorben war. Nun überlegen sie, ob die Lernsoftware zum Kennen- und Verstehenlernen neuronaler Netze frei zugänglich ins Internet soll oder ob sie kommerziell vermarktet werden kann.

Rechnen lernen im Dschungel

Zwei Sonderpreise gehen in die Schweiz und nach Österreich. Schüler der Bundesakademie in Steyr (Oberösterreich) richten ihre Bemühungen auf ein ganz junges Publikum. »Bananenjäger 1.0« heißt das Programm, mit dem Grund- und Vorschüler das Rechnen lernen sollen. Dazu dürfen sie eine Affenfamilie in den Dschungel begleiten, wo sie zusammen mit dem Sohn Bubu die Grundrechenarten entdecken und sich in die Mengen- und Zahlenlehre stürzen. Ein besonderes Lob bekommen die Programmierer dieses Beitrags, da sie zwar schon die Klasse 4 besuchen, was in Deutschland der 12. Klasse entspricht, sich aber nicht zu gut waren, für die ganz Kleinen eine Lernsoftware zu entwickeln.

Die Schüler der Klasse M5a der Kantonsschule Limmattal (Schweiz) schaffen es, die Exponentialfunktion und die Radioaktivität didaktisch anschaulich zu machen, indem sie beispielsweise den Zerfallsprozess eines radioaktiven Materials durch ein Zufallsexperiment nachspielen. Eine große Menge von Würfeln wird geworfen; diejenigen, die eine Eins oder Zwei zeigen, fallen heraus, dann wird wieder gewürfelt, und so weiter. Zwar entscheidet der Zufall, wie viele Würfel pro Durchgang aus dem Spiel ausscheiden, statistisch ergibt sich aber doch ein Gesetz. Dass es für diese Arbeit für jeden »nur« einen USB-Stick gab, störte die Elftklässler Jonathan Brignoli und Felix Neff wenig: »Wir sind froh, dass zwei Tage Schule ausfallen. Das ist Belohnung genug«, geben sie in ihrem charmanten Schweizer Dialekt zu. ◁

Emanuela Buyer hat Physik studiert und ist derzeit Referendarin in Singen.

Jugendsoftwarepreis

Der Preis wird jährlich ausgeschrieben. Teilnehmen können Schüler, Schülergruppen und Schulklassen in Deutschland, Österreich und der Schweiz bis zum Alter von 21 Jahren. Ausgezeichnet werden herausragende, von Schülern entwickelte Softwareprodukte, die Erkenntnisse und Experimente aus den Naturwissenschaften und der Mathematik verständlich und unterhaltsam vermitteln.

Eingereicht werden können:

- interaktive Multimedia-Programme, die Wissen besonders anschaulich und unterhaltsam vermitteln, und
- Experimentierprogramme, die modellartig Funktionen, Prozesse und Systeme aus der Mathematik oder den Naturwissenschaften nachbilden.

Einsendeschluss für dieses Jahr ist der 17. September 2007.

Klaus Tschira Stiftung gGmbH
Villa Bosch
Jugendsoftwarepreis
Schloss-Wolfsbrunnenweg 33
69118 Heidelberg
Telefon 06221 533109
www.jugendsoftwarepreis.de

Baukasten für Biomaschinen

Prinzipien und Methoden der Ingenieurwissenschaften könnten der Biotechnologie, die bisher eher einem spezialisierten Kunsthandwerk gleicht, zum Status einer reifen Industrie verhelfen.

Von der Bio-Fab-Gruppe

Seit mindestens drei Jahrzehnten ist der Begriff Gentechnik oder Gentechnologie nunmehr gebräuchlich. Längst gehören die Verfahren zur künstlichen Rekombination von DNA zu den tragenden Säulen moderner biologischer Forschung. Noch immer aber hat die Arbeit der meisten »Bioingenieure« wenig Ingenieurmäßiges an sich. Einer der Gründe hierfür liegt in den »Werkzeugen« zum Bauen mit biologischen »Teilen«: zu wenig standardisiert und zu wenig von breitem Nutzem. Hier besteht erheblicher Nachholbedarf gegenüber anderen Sparten der Ingenieurwissenschaften. Ein weiterer Grund sind die Methoden und Denkweisen der Biologie, obwohl auch diese stark von technologischen Konzepten beeinflusst sein können.

In der Elektronik beispielsweise begann der revolutionäre Wandel, als 1957 Jean Hoerni von Fairchild Semiconductor – einer kleinen Firma in einem Tal nahe Los Angeles, dem späteren Silicon Valley – die Planartechnologie erfand. Mit Ätz- und Dotierungsschritten unter Einsatz von Matrizen, die als Fotomasken bezeichnet werden, vermochte er aus Siliziumscheiben Transistoren zu erzeugen. Dieses neuartige Verfahren ermöglichte dann die durchweg präzise Herstellung integrierter Schaltkreise, wobei sich durch einfache Variation der Fotomaske verschiedenste Verschaltungstypen realisieren ließen. Schon bald konnten Ingenieure auf ganze Bibliotheken einfacher Schaltkreise zugreifen, die andere entwickelt hatten, und sie zu immer komplexeren Architekturen für ein immer breiteres Spektrum von Anwendungen kombinieren.

In Kürze

- Flexible, dabei zuverlässige Fertigungstechnologien zusammen mit **standardisierten Methoden** und **frei zugänglichen Designbibliotheken** führten zur modernen Halbleiterfabrikation. Das System der Chip-»Fab« ermöglicht den Ingenieuren die Konstruktion außerordentlich komplexer und leistungsfähiger elektronischer Baugruppen mit einem breiten Anwendungsspektrum.
- Durch Übernahme des Fab-Prinzips könnten Bioingenieure aus biologischen Bauteilen **ausgeklügelte artifizielle Baugruppen und Systeme** konstruieren.
- Bio-Fab-Technologien und -methoden werden bereits entwickelt und eingesetzt. Aktuelle Bemühungen gelten unter anderem der **Erarbeitung von Sicherheitsstandards** und dem Ziel, Biologen stärker zu ingenieurwissenschaftlichem Denken anzuregen.

Zuvor war die Herstellung elektronischer Schaltkreise eine Art Kunsthandwerk, denn die benötigten Transistoren mussten einer nach dem anderen miteinander verdrahtet werden. Diese Art der Fertigung, mit ihrem heterogenen Ergebnis, war ein ausgemachter Hemmschuh für die noch junge Elektronikindustrie. Die Planartechnologie hingegen, die sich ständig verbesserte, ermöglichte es, die Leistung integrierter Schaltkreise – dem Moore'schen Gesetz folgend – ungefähr alle 18 Monate zu verdoppeln. Benannt ist es nach Gordon E. Moore, einem Mitbegründer von Intel.

Die Chipfabrikation oder kurz Chip-Fab mit ihrer Serienproduktion resultiert aus dieser Kombination von Verfahren und Methoden zum Design und zur Fertigung von Halbleiterchips. Sie stellt eine der größten technologischen Erfolgsgeschichten dar und bietet ein nützliches Vorbild für einen anderen noch jungen Technologiesektor: die »Fabrikation« biologischer Systeme.

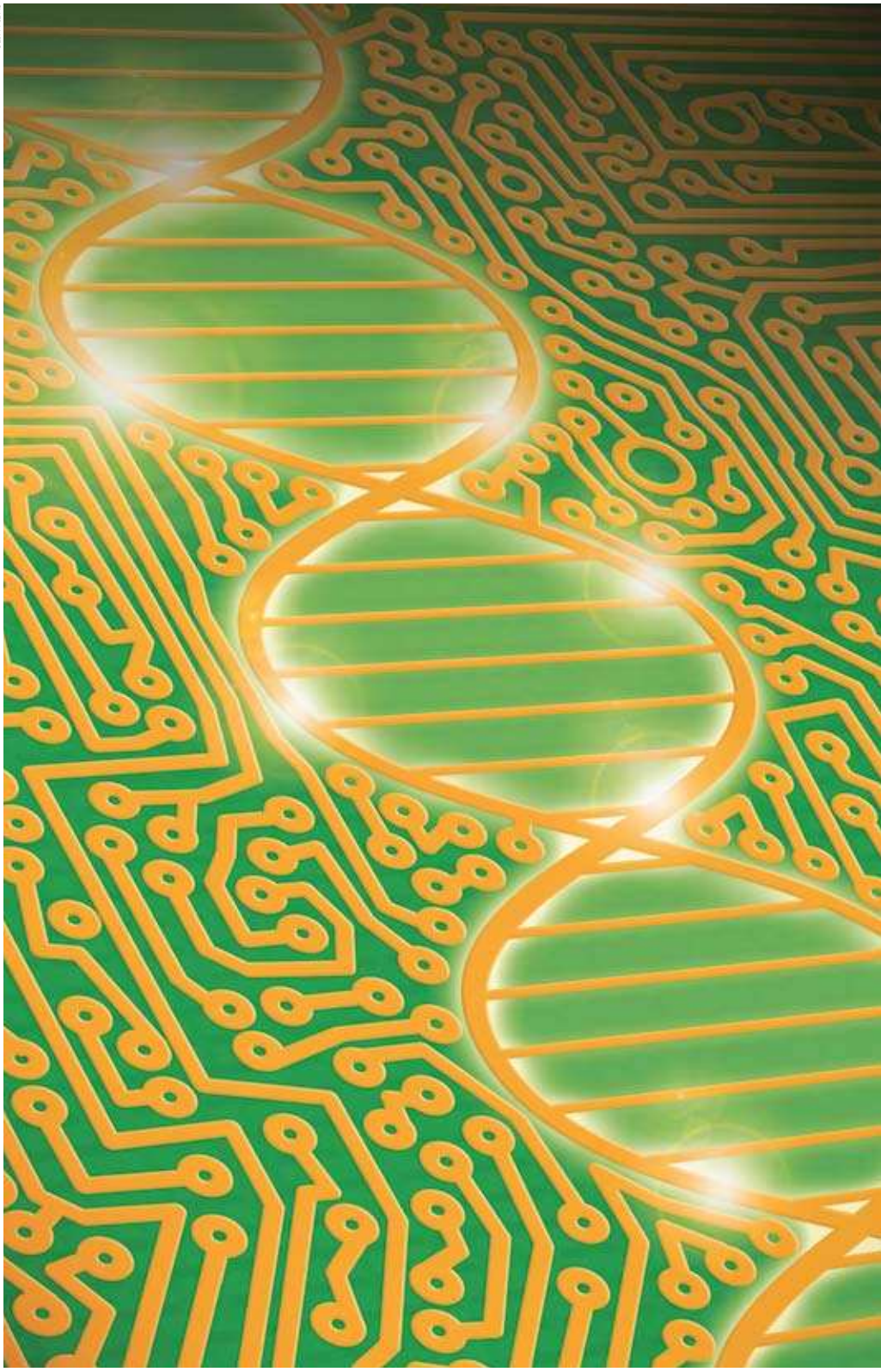
Die heutigen Gentechniker löten im Prinzip immer noch jeden Schaltkreis von Hand zusammen. Unser Kollege Tom Knight vom Labor für Künstliche Intelligenz des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge drückte es so aus: »Alle verwendeten Reaktionen zum Zusammenbau von DNA sind mangels Standardisierung zwangsläufig sowohl ein Werkzeug zur Untersuchung einer biologischen Fragestellung als auch ein Experiment an sich.« Eine Standardisierung von Methoden wie auch der Komponenten in

der Biotechnik könnte Musterbibliotheken aus modularen, kompatiblen Einzelteilen entstehen lassen und ein Outsourcing der Fertigung ermöglichen. Letzteres würde die Produktion von der Konzeption abkoppeln. Damit könnten sich viele Bioingenieure ausschließlich dem Entwurf immer komplexerer Baugruppen widmen und diese Komplexität etwa mit Hilfe der CAD-Technik, dem computergestützten Design, bewältigen.

Mitglieder unserer Gruppe arbeiten daher an der Entwicklung von Ausrüstungen und Techniken, die Basis einer »Bio-Fab« werden könnten. Ein weiteres Anliegen: das Entstehen einer Forschergemeinde zu fördern, welche die besten Prinzipien und Praktiken der Ingenieurtechnik in der Biotechnologie anwendet.

Betrachtet man Transistoren als die Basisbauteile elektronischer Schaltkreise, so sind ihre biologische Entsprechung die Gene – lange Abschnitte DNA mit jeweils definierter Sequenz. Um genetische Schaltkreise für fortschrittliche Baugruppen herzustellen, brauchen wir also eine Methode zur schnellen, akkuraten und preiswerten Produktion langer DNA-Stücke. ▷

SLIM FILMS



Standardisierte biologische Bauteile, etwa für künstliche genetische Schaltkreise (hier in der Mitte symbolisiert durch die Doppelhelixstruktur der DNA), sind die Basis einer Biotechnologie, die sich an Vorbildern aus der Halbleiterindustrie orientiert.

▷ Aufbauend auf Vorarbeiten anderer Forscher entwickelte Marvin H. Caruthers von der Universität von Colorado in Boulder vor zwanzig Jahren ein System zur Synthese von einzelsträngiger DNA, und zwar auf Basis der natürlichen Prozesse. Einen einzelnen DNA-Strang darf man sich als eine Seite eines Reißverschlusses vorstellen, der vier Arten von Zähnchen trägt. Chemisch handelt sich um verkettete Nucleotidbausteine. Ihr charakteristischer Bestandteil ist eine von vier Nucleotidbasen, die mit den Buchstaben A (für Adenin), C (Cytosin), G (Guanin) oder T (Thymin) bezeichnet werden. Fest verkettet zum Strang werden die Zähnchen über chemische Gruppen im Nucleotid, die das Stoffband repräsentieren. Die Zähnchen auf der anderen Seite des Reißverschlusses müssen dann komplementär sein, sonst kann er sich nicht sauber schließen.

Komplementär heißt hier: Im doppelsträngigen DNA-Molekül müssen einander gegenüberstehende Basen passende Wasserstoffbrücken ausbilden können. A tut das nur gut mit T, C dagegen nur gut mit G. Fachlich spricht man von Basenpaaren beziehungsweise Basenpaarung.

Caruthers' Methode, die Phosphoramidit-Festphasenchemie, ist auch heute noch die Basis der meisten kommerziellen DNA-Synthesesysteme. Dabei wird zunächst ein einzelnes geschütztes Nucleotid an einen Festphasenträger gebunden, etwa an ein Polystyrolkügelchen, das in einer Reagenzlösung schwimmt. Zugabe von Säure spaltet die namensgebende Amidit-Schutzgruppe des immobilisierten Nucleotids ab, danach kann es sich mit einem zweiten, frisch zugegebenen Baustein verbinden. Dann wird auch dessen Schutzgruppe abgespalten, ein drittes Nucleotid koppelt an und verlängert die Kette. Die vielfache Wiederholung dieses Reaktionszyklus ermöglicht die Synthese jeder beliebigen DNA-Sequenz mit einer Genauigkeit, bei der auf hundert Basen ungefähr eine falsche kommt.

Wie man die Fehlerrate senkt

Leider sind viele der genetischen Konstrukte, die Bioingenieure herstellen möchten, wesentlich länger. Eine recht simple Anordnung weniger Gene kann bereits mehrere tausend Basenpaare umfassen, das Genom selbst so einfacher Organismen wie Bakterien sogar bereits mehrere Millionen Basenpaare. Einige aus unserer Gruppe suchten daher nach Möglichkeiten, DNA mit höherer Ausbeute und geringerer Fehlerrate zu synthetisieren. Ein naheliegendes Vorbild bot wieder der natürliche Prozess.

Die Synthese-Maschinerie lebender Organismen ist mit ihrer DNA-Polymerase und einer Reihe anderer Enzyme in der Lage, in einer Geschwindigkeit von bis zu 500 Nucleotiden pro Sekunde das Erbmolekül herzustellen und nachzubessern – falsch ist am Ende nur etwa eine von einer Milliarde Basen. Dies bedeutet eine billionenfach höhere Durchsatzleistung (Ausstoß geteilt durch Fehlerrate) gegenüber den schnellsten Synthesegeräten, die gerade einmal alle 300 Sekunden ein Nucleotid anknüpfen. In einer Zelle sind zudem mehrere Polymerase-Moleküle gleichzeitig am Werk, wenn eine lange DNA-Strecke, etwa ein ganzes bakterielles Genom, kopiert wird. Auf diese Weise kann es ein Bakterium auf etwa 5 Millionen Einheiten in 20 Minuten bringen.

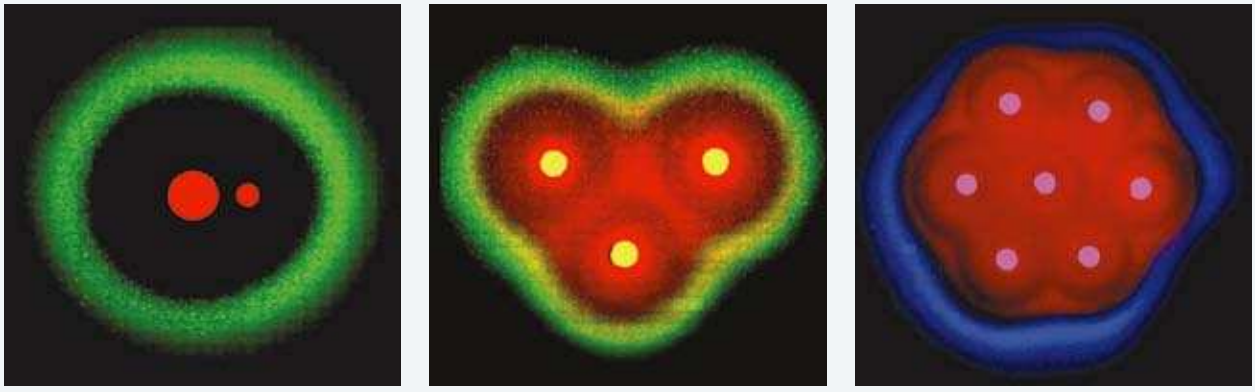
Ein Mitglied unserer Gruppe (Church) versucht, diese parallele Arbeitsweise durch Abwandlung der bereits existierenden Mikroarray-Technologie nachzuahmen. Solche Mikroarrays, manchmal auch DNA-Chips genannt, sind Trägerplatten, die in rasterpunktförmiger Anordnung kurze einzelsträngige DNA-Abschnitte von etwa 50 bis 70 Basen Länge tragen – ähnlich wie eine Bürste ihre gebündelten Borsten. Diese Oligonucleotide oder kurz Oligos werden simultan mittels Phosphoramidit-Chemie auf dem Mikroarray selbst synthetisiert. Das Raster erreicht eine Dichte von einer Million Punkten pro Quadratzentimeter, wobei jeder Rasterpunkt bei unserem experimentellen Array einen Durchmesser von 30 Mikrometern besitzt und etwa 10 Millionen Oligos identischer Sequenz enthält. Abweichend von der konventionellen Methode hatten wir Verbindungsstücke mit Schnittstellen für Schneidenzyme eingebaut, sodass wir Oligos selektiv vom Mikroarray abtrennen können.

Wir nennen diese DNA-Stränge Konstruktions-Oligos, da ihre Sequenzen von Punkt zu Punkt so gewählt sind, dass sie sich überlappen und sich daher später zu längeren Abschnitten wie einem ganzen Gen zusammensetzen lassen. Zuvor müssen jedoch Oligos mit fehlerhaften Sequenzen ausgesondert werden, was wir mit zwei verschiedenen Methoden erreichen. Bei der ersten produzieren wir Mikroarrays mit Selektions-Oligos. So nennen wir Einzelstränge, die zu den Konstruktions-Oligos komplementär sind. Diese Stränge trennen wir alle von ihrem Mikroarray-Träger ab und spülen sie auf den Konstruktionsarray. Dort lagern sie sich gemäß den Basenpaarungsregeln mit den jeweils passenden Konstruktions-Oligos zu DNA-Doppelsträngen zusammen. Nicht oder nur partiell passende Konstruktions-Oligos bleiben ganz oder teilweise ungepaart. Solche grob fehlerhaften Stränge werden vom Mikroarray entfernt.

Die Fehlerrate der Selektions-Oligos ist zwar genauso hoch wie die der Konstruktions-Oligos, da sie auf die gleiche

Lebende Maschinen

Die bunten ringförmigen Muster werden von gentechnisch umprogrammierten Bakterien erzeugt, wenn sie Signale aus Kolonien von Senderzellen (links rot, Mitte gelb, rechts pink) empfangen. Bei den Empfängern handelt es sich um manipulierte *Escherichia-coli*-Bakterien, die auf dem Untergrund zu einem geschlossenen »Rasen« heranwachsen durften. Sie detektieren Substanzen von den Senderzellen, die inmitten des Rasens platziert wurden. Je nach Abstand von den Quellen produzieren die Empfänger dann verschiedenfarbig fluoreszierende Proteine. Die Distanz schätzen sie gewissermaßen ab: über die abnehmende Konzentration der Signalsubstanz. Durch Variation der Ausgangsposition der Senderkolonien lassen sich immer komplexere Farbmuster erzeugen. Artifizielle vielzellige Systeme wie diese können in der Forschung nützlich sein, um die Signalübertragung und Musterbildung in natürlichen Zellsystemen – etwa einem sich entwickelnden Embryo – besser zu verstehen. Die gleiche Technologie könnte auch in der Sensortechnik zum Einsatz kommen, ebenso bei der Herstellung dreidimensionaler Gewebe für die regenerative Medizin und bei der Biofabrikation von Werkstoffen mittels gentechnisch programmierter Organismen.



RON WEISS, PRINCETON UNIVERSITY

Weise hergestellt werden. Weil jedoch die Wahrscheinlichkeit extrem gering ist, dass eine fehlerhafte Sequenz des einen Sortiments ein perfektes Gegenstück – eines mit komplementärem Fehler – im anderen Paket vorfindet, funktioniert diese Art des Korrekturlesens recht gut. Sie senkt die Fehlerrate der Oligos auf durchschnittlich einen pro 1300 Basen.

Unsere zweite Methode ist direkt der Natur entliehen. Ein anderes Gruppenmitglied (Modrich) hatte die Details des natürlichen Prozesses vor etwa zehn Jahren herausgearbeitet. Paaren sich zwei DNA-Einzelstränge, die nicht genau komplementär sind, so kann die entstehende Doppelhelix an der kritischen Stelle keine korrekte helikale Struktur ausbilden. Ein natürliches Protein, das solche Strukturabweichungen erkennt, ist MutS (es rekrutiert in der Zelle dann als Helfer MutL und MutH, die den Fehler korrigieren). Dadurch gelang es einem weiteren Mitglied (Jacobson) zusammen mit Peter Carr vom MIT, die Fehlerrate langer synthetischer DNA drastisch zu senken. Auf 10 000 Basen kommt dann nur eine falsche – und eine solche Genauigkeit reicht aus, um künstlich kleine Netzwerke mit mehreren Genen herzustellen.

Diese Kombination – Parallelsynthese abtrennbarer Oligos und Ausmerzen der fehlerhaften – ermöglicht uns, lange relativ fehlerfreie DNA-Konstrukte weit schneller und kostengünstiger als bisher herzustellen. Mit ihr als Basis lässt sich daher eine Biofabrikation aufbauen, zumal die Prozesse voraussichtlich stetig verbessert werden, ähnlich wie bei der Lithografie der Halbleiterchips. Damit sind wir frei, darüber nachzudenken, was wir in der Bio-Fab eigentlich herstellen wollen.

Bioproduktion von Malariamitteln

Eines unserer ersten Ziele ist, die Bio-Fab-Plattform zur Erforschung neuer Wege bei der Bekämpfung von Krankheiten zu nutzen. Zwei Mitglieder unserer Gruppe (Keasling und Baker) leiten Labors, die nach Therapien für zwei der weltweit wichtigsten übertragbaren Krankheiten suchen: Malaria und HIV-Infektionen. Zwar geht es um jeweils andere Arten von Medikamenten, doch sind beide Teams bei ihrer Forschungsarbeit stark darauf angewiesen, lange DNA-Sequenzen möglicht präzise herzustellen. Unsere Projekte bieten daher Beispiele, wie der Bio-Fab-Ansatz erheblich die Art und Weise verändern wird, in der die biomedizinische Forschung an die Entwicklung neuer Therapien herangehen kann.

Ein Wirkstoff, der sogar resistente Malariaerreger im Körper des Patienten abzutöten vermag, ist Artemisinin. Er stammt aus dem Beifußgewächs *Artemisia annua*, das sich von Eurasien bis nach Nordamerika verbreitet hat. Die Pflanze, ein in der traditionellen chinesischen Medizin verwendetes Heilkraut, enthält jedoch zu wenig Wirkstoff. Über ihren Anbau kann die für einen breiten Einsatz nötige Menge nicht zu vertretbaren Kosten gewonnen werden. Biotechnologie ist gefragt. Für die pflanzliche Produktion des kleinen Moleküls ist ein ganzer Satz von Enzymen und damit deren Genen zuständig. Keaslings Gruppe arbeitet seit fünf Jahren daran, mit Hilfe von Genen verschiedener Organismen das System zu kopieren und in Hefezellen zu transferieren. Man kann diese ähnlich wie Bakterien zur Massenproduktion von Wirkstoffen in Fermentern züchten.

Die Artemisinin-Synthese in Hefen läuft inzwischen bis zur Artemisinsäure, die dann chemisch in das gewünschte Produkt umgewandelt werden kann. Jetzt gilt es, das System durch Modifikationen effizienter zu machen. Bei Bakterien ist es uns bereits gelungen, wichtige Untergruppen der Gene für den so genannten Mevalonatweg einzuschleusen und so umzustricken, dass die Zellen ▷

▷ den Artemisinsäure-Vorläufer Amorphadien mit 100 000-fach höherer Ausbeute herstellen, als es das ursprüngliche pflanzliche Gensystem vermag.

Eine weitere Steigerung der Leistung, um Artemisinin breit verfügbar zu machen, erfordert ein integratives Vorgehen am genetischen Syntheseweg als Ganzem. Dieser besteht aus neun Genen, jedes durchschnittlich etwa 1500 Basenpaare lang. Jegliche neue von uns konstruierte Version des Synthesewegs umfasst daher annähernd 13 000 Basenpaare. Zweckmäßig wäre, Abwandlungen jedes einzelnen Gens zu erzeugen und dann durchzuspielen, welche Kombinationen am besten funktionieren. Schon bei nur zwei Varianten für jedes Gen müssten 2^9 oder 512 verschiedene Kombinationen des Gesamtwegs synthetisiert werden, was sich zu einer Länge von etwa 6 Millionen Basenpaaren addiert. Mit konventionellen Methoden der DNA-Synthese wäre das eine schwer zu bewältigende Aufgabe. Diese Sequenzmenge lässt sich jedoch auf einem einzelnen Mikroarray-Chip unterbringen.

Die gleiche Technologie, mit der die Synthese genetischer Netzwerke en gros zu bewerkstelligen ist, kann auch zur Erzeugung neuartiger Proteine genutzt werden, zum Beispiel innovativer Biokatalysatoren für chemische Synthesen und den Abbau von Umweltgiften oder hochspezifischer Enzyme für die Gentherapie und die Zerstörung von Krankheitserregern. Bakers Gruppe entwickelt methodisches Rüstzeug für das computergestützte Design solch neuartiger Proteinstrukturen. Zwei davon imitieren essenzielle Oberflächenmerkmale des Aids-Erregers HIV, die bereits als potenzielle Impfstoffe gegen das Virus geprüft werden.

Die Computermodelle sind allerdings noch nicht so weit, dass jedes am »Reißbrett« neu entworfene Protein auch die gewünschte Funktion erfüllt. Sie liefern bisher lediglich Dutzende bis Hunderte viel versprechender Strukturen, die dann zu prüfen sind. Diese Varianten für ihre Herstellung zuvor in reale Gensequenzen umzusetzen, erfordert die Synthese Hunderttausender Basenpaare – bei Verwendung konventioneller Methoden ein schwieriges und teures Unterfangen, mit der ersten Generation der Bio-Fab-Technologie jedoch durchaus machbar.

Die beiden Projekte zur DNA- und Protein-Synthese im Bereich Malaria und HIV illustrieren einen Forschungsansatz, der erst durch die Bio-Fab-Plattform möglich geworden ist und der sich auch bei etlichen anderen Erkrankungen, einschließlich neuer Bedrohungen, anwenden ließe. Ein Beispiel: Durch Kombination kostengünstiger und leistungsfähiger DNA-Sequenziermethoden mit den Synthesekapazitäten der Bio-Fab ließe sich ein neuer Erreger wie das Sars-Coronavirus oder ein unbekannter Influenza-Stamm rasch charakterisieren und ein entsprechender Impfstoff auf Proteinbasis weit schneller herstellen als mit den bisherigen Methoden.

AARON CHEVALIER, UT-AUSTIN / UCSF

Leuchtende Grüße vom Bakterienrasen: Zellen des Darmbakteriums *Escherichia coli* bekamen dazu mehrere genetische Komponenten zur Lichtwahrnehmung und Farberzeugung eingeschleust. In Form eines Biofilms gewachsen und belichtet, hier mit einem kurzen Grußtext, gaben sie dann das Geschriebene in Leuchtschrift wieder.

Flipflop-Bioschalter

Natürlich geht es bei einer Bio-Fab um mehr als bloß um schnellere Synthesetechniken. Vielmehr steht dahinter ein Ansatz, existierende biologische »Maschinen« zu betrachten und neue zu entwerfen, der sich sowohl hinsichtlich der Terminologie als auch der Methoden bei den Ingenieurwissenschaften bedient.

Aus biologischen Teilen grundlegende Komponenten von Schaltkreisen zu konstruieren – einen Oszillator und ein Schaltwerk namens »Flipflop« –, gelang im Jahr 2000 zwei Forscherteams unabhängig voneinander: Michael Elowitz und Stanislas Leibler, damals an der Princeton-Universität (New Jersey), sowie einem Mitglied unserer Gruppe (Collins) mit Timothy S. Gardner und Charles R. Cantor von der Universität Boston (Massachusetts). Zwar war seit etwa 25 Jahren bekannt gewesen, dass lebende Organismen diese Art Verschaltung zur Genregulation nutzten, doch war es die erste Herstellung funktionierender künstlicher biologischer Schaltkreise.

Was wir mit diesem Begriff meinen, veranschaulicht der Ringoszillator recht gut, den Elowitz und Leibler als ersten Schritt zum Bau einer synthetischen biologischen Uhr konstruierten. Die beiden erhoffen sich davon Einsichten in die Funktionsweise der natürlichen inneren Uhren von Lebewesen. Basis des Schaltkreises war ein Plasmid, ein ringförmiges DNA-Molekül, mit drei Genen verschiedener Herkunft.

Sie trugen die Bauanweisung für drei Proteine mit den Kürzeln TetR, LacI und λcI. Soll ein Eiweißstoff in Produktion gehen, wird für die zelleigenen Proteinfabriken zunächst eine Art Genabschrift erstellt. Diese Arbeit erledigt ein Enzym namens RNA-Polymerase. Dazu muss es an den Promotor, eine DNA-Sequenz vor der Erbanlage, andocken können, sonst wird das Gen nicht abgeschrieben und sein Protein nicht erzeugt.

Elowitz und Leibler legten ihre Konstruktion so aus, dass jedes der drei Proteinprodukte selektiv den Promotor eines jeweils anderen Gens erkennen konnte: Das LacI-Protein besetzte und blockierte den Promotor des Gens für TetR, dieses Protein den für das λcI-Protein und dieses wiederum den für LacI. Die Synthese der drei Eiweißstoffe erfolgte dann zyklisch oszillierend: Ein Überschuss an LacI-Protein unterdrückte via Gen die Produktion von TetR, dessen Fehlen ermöglichte die Produktion von λ cI, das dann die des LacI-Proteins unterdrückte, sodass die Synthese von TetR ansprang und so weiter.

Eines der Proteine war zudem so ausgelegt, dass es auch mit dem Genpromotor für ein Protein interagierte, das grün fluoreszierte, wenn Licht bestimmter anderer Wellenlängen eingestrahlt wird. Nach dem Einschleusen des gesamten Schaltkreises in Bakterien ließ sich sein Oszillieren anhand der Schwankungen der Fluoreszenz beobachten: Die Bakte-

rien begannen zu blinken. Ähnlich verhält es sich bei der neuesten Version des genetischen Flipflops, den Collins' Gruppe entwickelt hat. (Technisch gesehen ist ein Flipflop, auch bistabiles Kippglied genannt, eine elektronische Schaltung, die zwei stabile Zustände annehmen und speichern kann.) Damit lassen sich Bakterien so programmieren, dass sie Schäden an ihrer DNA erkennen und dies dann sichtbar machen, indem sie einen grün fluoreszierenden Biofilm ausbilden.

Interessanterweise sind diese synthetischen biologischen Schaltkreise ihrer formalen Funktion nach identisch mit den ersten Typen von Schaltkreisen, die Elektronikingenieure konstruieren, wenn sie einen neuen Herstellungsprozess für Halbleiterchips testen. Jede Funktion, die ein Chip erfüllen muss, ist aus gewissen elementaren Funktionen (etwa AUS, OR oder NOT) zusammensetzbar. Für einen Entwickler ist es unerlässlich, Bauteile, die diese elementaren Funktionen realisieren, in ausreichender Präzision und Verlässlichkeit zur Verfügung zu haben. Entsprechend können die Bioingenieure erst, wenn derartige Grundbauteile bereitstehen, komplexere Projekte angehen: beispielsweise mehrzellige Systeme, zwei- oder dreidimensionale Anordnungen und Baugruppen, die nichtbiologische Funktionen erfüllen.

Ein Mitglied unserer Gruppe (Weiss) hat kürzlich den Prototyp eines mehrzelligen Systems vorgestellt, das sich beispielsweise nutzen ließe, um Sprengstoffe und andere Chemikalien zu detektieren und durch optische Signale anzuzeigen (siehe Kasten S. 89). Mit Hilfe dieser biologischen Maschinerie können wir Millionen Bakterien programmieren, sie mit Befehlen sowie Regeln versehen, wie sie beim Ausführen der Befehle mitei- ▷

Die Vorteile von Abstraktionshierarchien

Von Methoden, durch die hochkomplexe integrierte Schaltkreise (VLSI, *Very Large Scale Integrated Circuits*) für die Halbleiterindustrie machbar wurden, können auch Bioingenieure profitieren. Die weit gehende Standardisierung bei der so genannten Chip-Fab ermöglichte es den Chip-Ingenieuren, sich entweder auf die Entwicklung oder auf die Fertigung zu spezialisieren und dabei komplexe Probleme auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen anzugehen. Wenn Bioingenieure hierarchische Abstraktionsstufen einführen, die jeweils nicht benötigte Informationen verbergen, lässt sich hohe Komplexität ebenfalls bewältigen. Analog einem Chip-Fab-Designer müsste ein Bio-Fab-Designer, der auf der Systemebene arbeitet, sich lediglich darüber Gedanken machen, welche fertigen Baugruppen er verwendet und wie er sie am besten verbindet, damit das Ganze die gewünschte Funktion erfüllt. Für das Innenleben der Baugruppen ist die nächsttiefere Ebene zuständig – ein Entwickler auf dieser Ebene muss daher Funktion und Kompatibilität der genutzten elementaren Einzelteile kennen. Ein Teileentwickler wiederum sollte sich zwar mit der internen Funktionsweise der verschiedenen Elemente auskennen, muss jedoch nicht in der Lage sein, die DNA-Sequenzen, das Rohmaterial, zu synthetisieren.

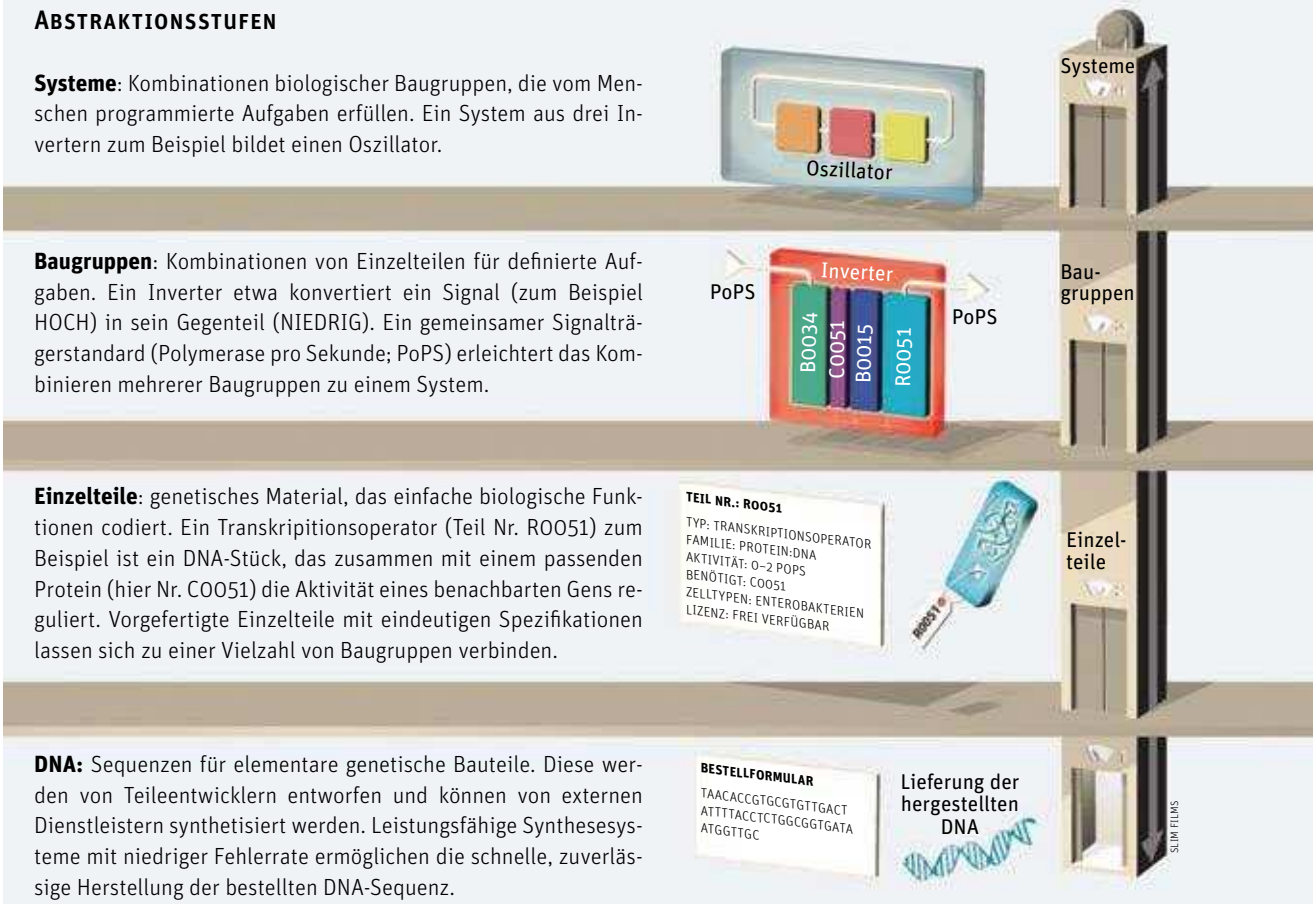
Abstraktionsstufen

Systeme: Kombinationen biologischer Baugruppen, die vom Menschen programmierte Aufgaben erfüllen. Ein System aus drei Invertern zum Beispiel bildet einen Oszillator.

Baugruppen: Kombinationen von Einzelteilen für definierte Aufgaben. Ein Inverter etwa konvertiert ein Signal (zum Beispiel HOCH) in sein Gegenteil (NIEDRIG). Ein gemeinsamer Signalträgerstandard (Polymerase pro Sekunde; PoPS) erleichtert das Kombinieren mehrerer Baugruppen zu einem System.

Einzelteile: genetisches Material, das einfache biologische Funktionen codiert. Ein Transkripitionsoperator (Teil Nr. R0051) zum Beispiel ist ein DNA-Stück, das zusammen mit einem passenden Protein (hier Nr. C0051) die Aktivität eines benachbarten Gens reguliert. Vorgefertigte Einzelteile mit eindeutigen Spezifikationen lassen sich zu einer Vielzahl von Baugruppen verbinden.

DNA: Sequenzen für elementare genetische Bauteile. Diese werden von Teileentwicklern entworfen und können von externen Dienstleistern synthetisiert werden. Leistungsfähige Synthesesysteme mit niedriger Fehlerrate ermöglichen die schnelle, zuverlässige Herstellung der bestellten DNA-Sequenz.



Mehr Sicherheit durch Synthese

Die Erforschung des vielfältigen Potenzials einer Bio-Fab für Medizin, Werkstoffentwicklung, Sensortechnik, Umwelttechnik und Energieproduktion steht noch am Anfang. Wie bei jedem lohnenden Unterfangen gibt es jedoch auch Risiken. Ein wesentliches Charakteristikum biologischer Systeme ist ihre Fähigkeit zur Reproduktion und Evolution, was zu der verständlichen Besorgnis geführt hat, dass artifizielle biologische Systeme versehentlich außer Kontrolle geraten oder zu unlauteren Zwecken missbraucht werden könnten.

Im Jahr 1975 fand in Asilomar (Kalifornien) die danach benannte Konferenz statt, in der ähnliche Bedenken gegenüber den damals neuen gentechnischen Methoden erörtert wurden. Erstmals konnten Forscher Erbanlagen von einem Organismus in einen anderen transferieren und so genetische Kombinationen hervorbringen, die in der Natur nicht existieren. Diese Rekombinationstechnologie gehört heute zum selbstverständlichen Handwerkszeug praktisch jedweden molekularbiologischen Labors der Welt, unter anderem weil die Leitlinien der Asilomar-Konferenz die Bedenken gegen den Einsatz gemildert hatten.

In gewissem Sinn ist also die Problematik der Bio-Fab-Technologie nicht neu. Dennoch fühlen sich die Forscher, die an der Entwicklung der synthetischen Biologie arbeiten, verpflichtet, mögliche Sicherheitsaspekte eingehend zu diskutieren. Ein Gremium von Wissenschaftlern und Ethikern erörterte diese Problematik auf der Konferenz Synthetic Biology 2.0 im Mai 2006. Die dabei erarbeiteten Empfehlungen sowie die Ergebnisse einer 15-monatigen Studie zu Chancen und Risiken der synthetischen Genomik und möglichen Sicherheitsvorkehrungen werden im Lauf der nächsten Monate auf der Website www.syntheticbiology.org veröffentlicht.

Inzwischen sind die Wissenschaftler gehalten, die bisher üblichen Sicherheitsstandards einzuhalten, also etwa in Labors der geeigneten biologischen Sicherheitsstufen zu arbeiten und ethische Standards zu respektieren, die uns 30 Jahre lang gute Dienste erwiesen haben. Verantwortungsvolle Wissenschaftler zu verantwortlichem Arbeiten anzuhalten ist natürlich relativ einfach. Es gilt jedoch auch zu bedenken, dass die künftige breite Verfügbarkeit von DNA-Synthesesystemen zum Beispiel Terroristen die Herstellung neuer tödlicher Krankheitserreger ermöglichen könnte. Einer der Mitglieder unserer Bio-Fab-Gruppe (Church) hat daher ein Überwachungssystem vorgeschlagen, das unter anderem die Registrierung aller Personen vorsieht, die an Projekten der synthetischen Biologie arbeiten – ähnlich wie in den USA schon heute Wissenschaftler, die sich mit bestimmten Risikoerregern befassen, bei der Regierung gemeldet sein müssen. Ebenso dazugehören sollte die Überwachung des Handels mit Designerorganismen sowie mit Gerätschaften und Vorläufersubstanzen der synthetischen Biologie.

SAM OGDEN

Solche Gläschen mit »BioBricks« enthalten DNA-Bauteile für die ingenieursmäßige Biotechnologie. Diese dürfen in Labors der untersten Sicherheitsstufe verwendet werden.

Interessanterweise könnte sich gerade die Bio-Fab-Technologie selbst als die ideale Sicherheitstechnik erweisen, da sie die vollständige Kontrolle über die Funktion der hergestellten Organismen ermöglichen wird. Für die meisten der in unserem Artikel beschriebenen Anwendungen müssten die synthetischen Organismen zwar nicht in die Umwelt entlassen werden, aber sicherheitshalber könnte man diese mit einem nichtnatürlichen genetischen Code programmieren. Dies machte es ihnen unmöglich, Gene mit freilebenden Organismen auszutauschen. Denkbar wäre auch eine synthetische biologische Baugruppe, die sich nach einer definierten Zahl von Zellteilungen selbst zerstört, oder eine künstliche Biomaschine, die zum Überleben auf Substanzen angewiesen ist, die in der Natur nicht vorkommen. Mit genetischen Wasserzeichen ließe sich der Ursprung jedes biologischen Standardbauteils ermitteln und der Verbleib der hergestellten Organismen überwachen. In anderen Sparten der Ingenieurwissenschaften bietet die gestiegene Präzision der Fertigung auch höhere Sicherheit, zum Beispiel bei den dreifach redundanten Steuerungssystemen moderner Flugzeuge. Entsprechendes dürfte, wie wir meinen, auch für artifizielle biologische Systeme gelten, die mit der Bio-Fab-Technologie hergestellt werden.

▷ nander zu kommunizieren und Lichtsignale unterschiedlicher Anordnung zu erzeugen haben.

Inspiriert durch diese ersten Erfolge entwickelt ein weiteres Mitglied (Endy) zusammen mit Knight und unserem Kollegen Randy Rettberg vom MIT nun eine Bibliothek biologischer Bauteile, ähnlich der für Chip-Entwickler. Dieses »Register standardisierter biologischer Bauteile«, so der offizielle Name, sollte die Realisierung zahlreicher Biokonstruktionsprojekte erheblich erleichtern. Wir hoffen, dass auch andere Arbeitsgruppen Beiträge liefern werden. Das Register verzeichnet derzeit mehr als 1000 BioBricks (nach dem englischen Wort für Ziegel- oder Bausteine). Darunter sind zahlreiche, die analog zu elektronischen Komponenten funktionieren, zum Beispiel Inverter, Schalter, Zähler, Verstärker und Komponenten, die Signale empfangen oder etwas Sichtbares darstellen. Auch ein Signalträgerstandard wurde definiert: PoPS, Polymerase pro Sekunde – wievielmal die RNA-Polymerase ein Gen in der Sekunde abschreibt. Das ist sozusagen die gemeinsame Währung der BioBricks – analog dem Strom, der zwischen zwei elektronischen Bauteilen fließt. Bio-Fab-Ingenieure können so die genetischen Inverter und andere Komponenten leichter kombinieren und weiterverwenden.

Um die vielfältigen Möglichkeiten des Bio-Fab-Ansatzes zu demonstrieren und das neue Feld zu bestellen, bot die MIT-Gruppe 2003 den ersten Studentenkurs mit der Aufgabe an, nach Fab-Art aus biologischen Komponenten Neues zu konstruieren. Aus dieser Veranstaltung entwickelte sich rasch ein jährlicher Wettbewerb, an dem im Sommer 2006 Teams von mehr als 30 Universitäten teilnahmen. In seiner kurzen Geschichte hat der International-Genetically-Engineered-Machine-(iGEM)-Wettbewerb schon eine Reihe erstaunlicher Ergebnisse erbracht, darunter Biofilme, die Fotos aufnehmen und wiedergeben, sowie programmierte Zellen, die niedermolekulare Substanzen wie Coffein wahrnehmen und darauf reagieren, als wären sie ein Schalter.

Auch ein digitales Zählwerk auf der Basis einer Serie von DNA-Elementen gehört dazu. Entwickelt haben es drei Mitglieder unserer Gruppe, nämlich Smolke, Collins und Church. Zwanzig solcher DNA-Bits würden ausreichen, um 2^{20}, also rund eine Million Ereignisse (jedes Durchlaufen eines bestimmten Zellzustands) abzuzählen und darzustellen. Diese Technologie könnte in Sensoren eingebaut werden. Würden diese wiederum mit artifiziellen Stoffwechselwegen verkoppelt, wie mit der von Keaslings Gruppe optimierten Version des Artemisinin-Synthesewegs, ließe sich die Produktion der gewünschten Substanz buchstäblich durch das Umlegen eines Schalters hochfahren.

Studiengang Ingenieur-Biologie

Als wir gemeinsam darangingen, eine Bio-Fab aufzubauen, gab es noch keinen klaren Ansatz zur präzisen, raschen und kostengünstigen Herstellung von langen DNA-Sequenzen. Heute ist die Methode nur eine von mehreren in der zunehmend reichhaltigeren Werkzeugkiste der Bioingenieure. Nun gehen wir dazu über, synthetische biologische Baugruppen zunächst im Computer zu entwerfen und zu modellieren und sie dann erst in die biologische Fassung zu bringen, ähnlich wie Halbleiterchips zunächst im Computer entworfen und dann lithografiert werden.

Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass wir ähnlich wie bei elektronischen Schaltkreisen die Interaktionen zwischen den Komponenten im Voraus optimieren und Fehler erkennen können. Sie gewinnt umso mehr an Bedeutung, je komplexer die zu konstruierenden Systeme werden. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass der Bioingenieur nicht jedes Bauteil selbst konstruieren, ja nicht einmal dessen Innenleben kennen muss – er muss nur wissen, was das angebotene Teil leistet, und sich ansonsten darauf verlassen können, dass es zuverlässig funktioniert. Er kann sich beim Design auf eine höhere Abstraktionsebene beschränken (siehe Kasten S. 91).

Die Studenten, die am iGEM-Wettbewerb teilnehmen, könnten die erste Generation von »Ingenieur-Biologen« sein, für die es von vornherein selbstverständlich ist, sich als beides zu begreifen. Eine wichtige Zukunftsaufgabe wird sein, mehr Biologen dafür zu gewinnen, wie Chip-Ingenieure zu denken (und mehr Ingenieure für die Biologie zu interessieren) – insbesondere wenn es darum geht, standardisierte Bauteile für andere Arbeitsgruppen verfügbar zu machen. Bisher ist die Biotechnologie durch abgeschlossene Teams gekennzeichnet, die an Insellösungen für spezielle Probleme arbeiten, wie etwa der Herstellung eines Wirkstoffs. Die Biotechnologie der Zukunft hingegen erfordert stärker den Beitrag vieler Gruppen, die modulare Untersysteme zur Verfügung stellen. Wir hoffen, dass der Aufbau einer biologischen Fabrikation diese Entwicklung fördern und ähnlich revolutionäre Fortschritte einleiten wird wie einst in der Halbleiterindustrie. ◁

Anfänge der Biofabrikation

Einige wenige Unternehmen und Organisationen wenden bereits für eine kommerzielle biologische Fabrikation ingenieurwissenschaftliche Prinzipien und Werkzeuge an. Damit rückt die Verwirklichung der anvisierten Bio-Fab näher.

Unternehmen	Schwerpunkte
BioBricks Foundation Cambridge (Massachusetts)	frei verfügbare Werkzeuge, Standards und Einzelteile für die ingenieursmäßige Biotechnologie
Blue Heron Biotechnology Bothell (Washington)	DNA-Synthese
Amyris Biotechnologies Emeryville (Californien)	Konstruktion von Stoffwechselwegen zur Herstellung pharmazeutischer Wirkstoffe in Mikroorganismen
Codon Devices Cambridge (Massachusetts)	Entwicklung artifizieller biologischer Baugruppen
Foundation for Applied Molecular Evolution Gainesville (Florida)	Herstellung neuartiger Proteine und Werkstoffe
Synthetic Genomics Rockville (Maryland)	Konstruktion von Mikroorganismen, die Treibstoffe herstellen

Die Mitglieder der Bio-Fab-Gruppe sind **David Baker** von der Universität von Washington in Seattle, **George Church** von der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts), **Jim Collins** von der Universität Boston, **Drew Endy** und **Joseph Jacobson** vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, **Jay Keasling** von der Universität von Kalifornien in Berkeley, **Paul Modrich** von der Duke-Universität in Durham (North Carolina), **Christina Smolke** vom California Institute of Technology in Pasadena und **Ron Weiss** von der Universität Princeton (New Jersey). Als Freunde und Kollegen arbeiten sie im Rahmen verschiedener Projekte zusammen. Alle Autoren sind gleichzeitig Berater der Firma Codon Devices in Cambridge, die sich als erstes Unternehmen zum Ziel gesetzt hat, Konzepte der Ingenieurwissenschaften auf die synthetische Biologie zu übertragen. Church, Endy, Jacobson und Keasling gehören zu ihren Gründern. Endy hat zudem die nichtkommerzielle BioBricks Foundation ins Leben gerufen, und Keasling gründete Amyris Biotechnologies.

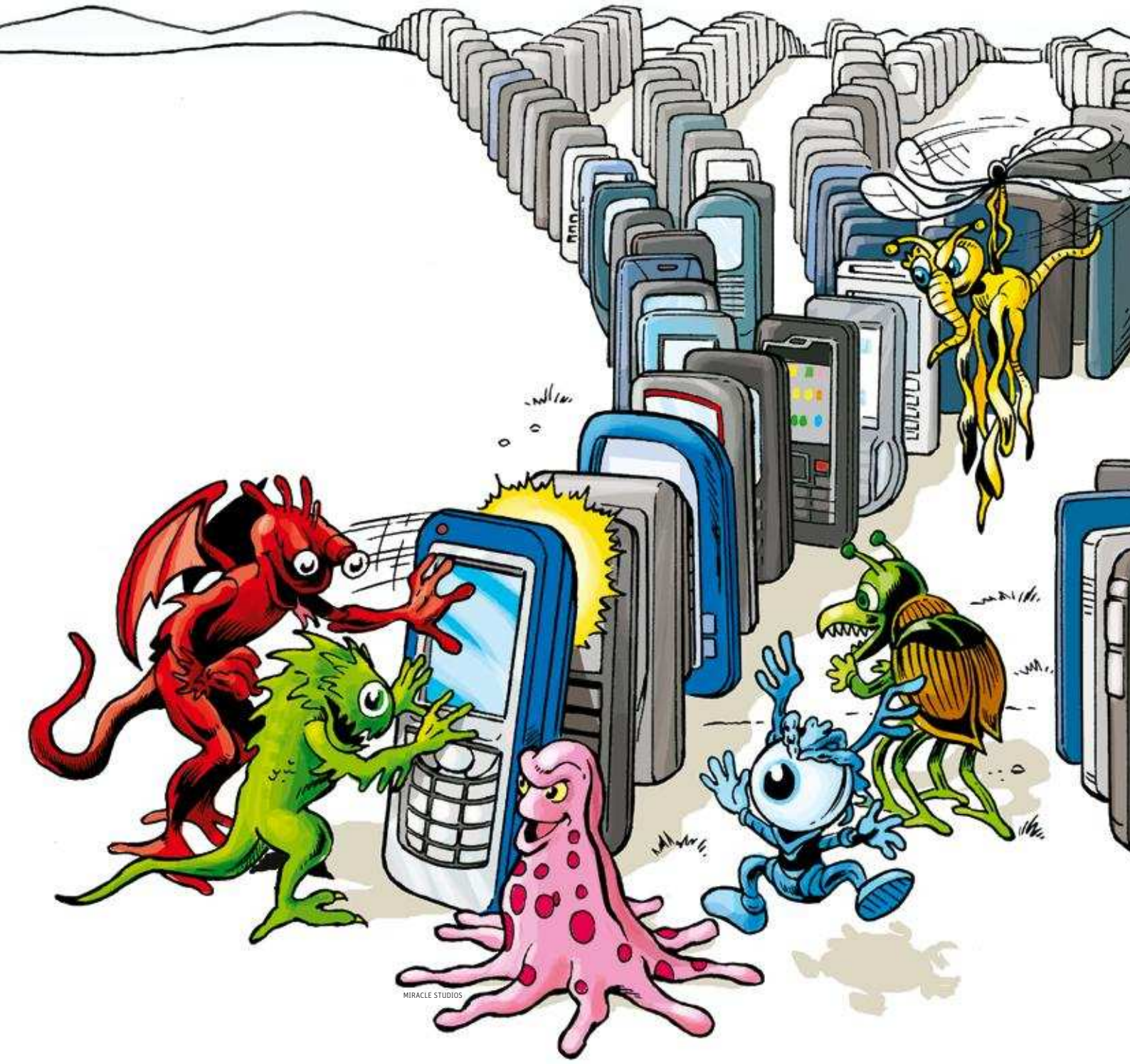
Künstliche Biomaschinen. Von W. Wayt Gibbs in: SdW 10/2004, S. 68

Foundations for engineering biology. Von Drew Endy in: Nature, Bd. 438, 24. November 2005, S. 449. Im selben Heft: Let us go forth and safely multiply. Von George Church, S. 423

Adventures in synthetic biology. Von Drew Endy, Isadore Deese, the M.I.T. Synthetic Biology Working Group und Chuck Wadey. Ein Comicbuch, online verfügbar unter http://openwetware.org/wiki/Adventures

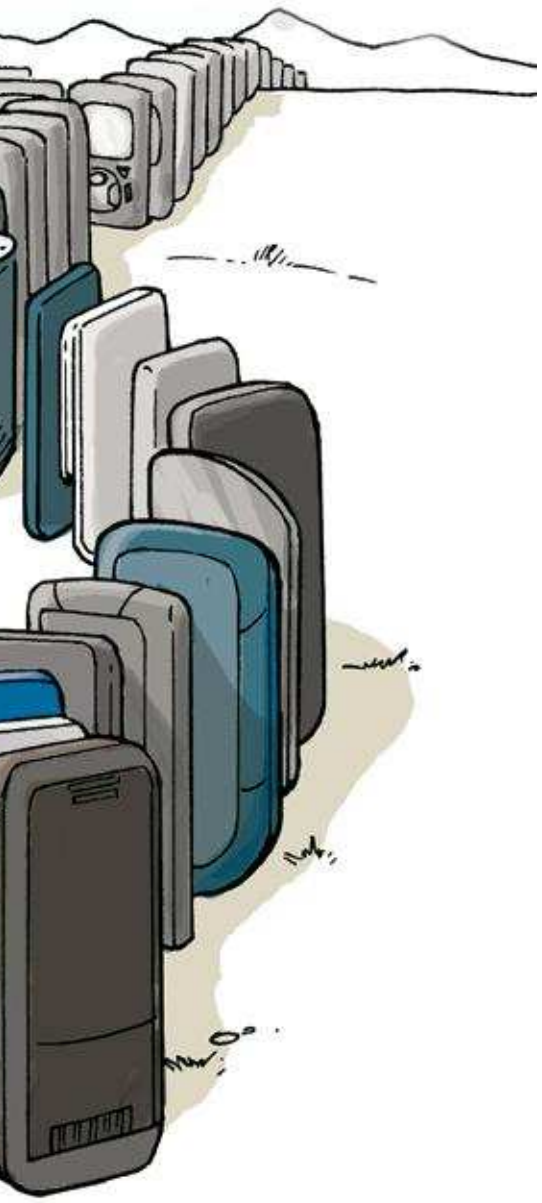
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/860730.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



MIRACLE STUDIOS

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio



Angriff der mobilen Computerviren

Seit Kurzem verbreiten sich schädigende Programme auch drahtlos und überfallen programmierbare Mobiltelefone. Jede Handy-Verbindung ist eine Geldtransaktion, und so könnten die »Malware« genannten Übeltäter zur teuren Plage werden.

Von Mikko Hypponen

Im Juni 2004 infizierte sich ein Mobiltelefon mit dem Computerwurm Cabir. Damit geschah, was Experten seit Jahren befürchtet hatten. Immer mehr Mobiltelefone sind vielseitige Computer – so genannte Smartphones –, mit denen man im Internet surfen und von dort Programme herunterladen kann. Drahtlos stehen sie im Kontakt mit anderen Geräten und nutzen dafür Bluetooth-Verbindungen, einen Funkstandard zur Datenübertragung mit geringer Reichweite. Auch über den Multimedia Messaging Service (MMS), der Text- und Bilddateien im Mobilfunk- und Festnetz übermittelt, sowie über austauschbare elektronische Speicherkarten kommunizieren diese neuen Mobiltelefone mit der Außenwelt. Die Grenze zu Büro- oder Heimcomputern verwischt immer mehr, und dass man mit Smartphones auch telefonieren kann, wird für manche Anwender zur Nebensache.

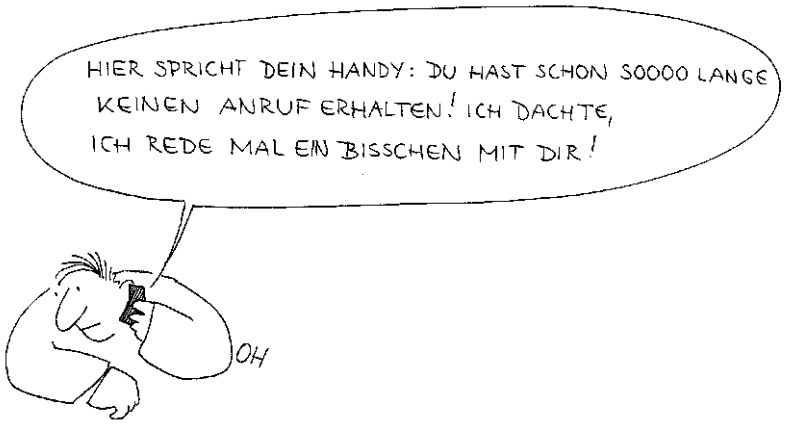
Doch neue technische Möglichkeiten beschwören auch neue Gefahren herauf. Cabir – eigens geschrieben, um Smartphones zu infizieren – war zunächst ein recht harmloses Programm, das zwar in das System einbrach, sonst jedoch keinen großen Schaden anrichtete, außer dem, den Akku des infizierten Telefons beim Versuch, sich über neue Bluetooth-Verbindungen weiterzuverbreiten, zu leeren. Vermutlich hatte ein Programmierer aus Spanien Cabir auf eine Internetseite gestellt, anstatt den Wurm selbst per Mobiltelefon in Umlauf zu bringen – das erledigten dann Tüftler in Südostasien binnen zweier Monate; von dort verbreitete sich Cabir weltweit.

Experten hatten damit gerechnet, dass Programme wie Cabir auftauchen würden. Als es dann jedoch dazu kam, waren sie nicht in der Lage, dessen Ausbreitung einzudämmen. Kurz nachdem Cabir entdeckt wurde, begann ich mit Kollegen, seine Struktur zu untersuchen. Schnell merkten wir, dass es sich um einen Computerwurm handelte, also ein Programm, das sich selbstständig (»aktiv«) in Netzwerken ausbreitet.

Tarnen sich die Programme durch Vortäuschen einer falschen Identität, werden sie Trojaner genannt. Klassische Computerviren verbreiten sich hingegen passiv: Sie nisten sich in Programme oder Dateien ein und werden von deren Benutzern zumeist unwissentlich weitergegeben.

Alle Formen der bösartigen, sich ohne Wissen oder Wollen der Computerbenutzer verbreitenden Programme werden ▷

Dominoeffekt: Wird ein Smartphone zum Opfer von mobiler »Malware« – vor allem Computerviren oder Computerwürmern –, dient es dieser als Ausgangspunkt, um sich weiterzuverbreiten.



▷ inzwischen als Malware (kurz für englisch *malicious software*) bezeichnet.

Um Cabir genauer zu untersuchen, mussten meine Mitarbeiter und ich einen sicheren Ort finden, von dem aus sich das Programm nicht weiterverbreiten konnte. Wir entschieden uns dafür, vier infizierte Mobiltelefone in den bombensicheren Keller des Bürogebäudes unserer Firma mitzunehmen – und stellten einen Wachmann vor die Tür, damit kein ahnungsloser Mitarbeiter hineinspazierte und sein Mobiltelefon angesteckt würde. Bald darauf bauten wir eigens zwei Labore, die wir mit Aluminium- und Kupfergittern vor Radiowellen abschirmten.

War die ursprüngliche Fassung von Cabir noch recht harmlos, machten sich einige Programmierer daran, Versionen zu entwickeln, die leichter übertragbar und schädlicher sind. Andere ersannen neue Angriffswege – mit dem Ergebnis, dass drahtlos übertragene Viren nicht nur das Telefon lahmlegen, sondern auch die darauf gespeicherten Daten löschen und besonders kostspielige Verbindungen aufbauen können.

Inzwischen existieren mehr als 200 auf Smartphones übertragbare Viren, und damit scheint sich eine Entwicklung zu wiederholen, die dem dramatischen Anstieg der Computerviren seit dem Auftauchen von »Brain« im Jahr 1986 ähnelt.

Trotz der vielen Bemühungen, Viren auf PCs zu bekämpfen, steigt deren Zahl weiter an: Mehr als 200 000 sind inzwischen bekannt. Im Kontakt mit dem Internet kann sich ein ungeschützter PC bereits nach wenigen Minuten infizieren. Bereits heute verursacht Malware enorme Kosten, die noch weiter wachsen werden, wenn sich die »Crimeware« weiterverbreitet: Programme, die als elektronischer Müll die E-Mail-Postfächer füllen, Daten sowie Passwörter rauben und zum Werkzeug für Erpresser werden. Über die Jahre kamen zu den Viren andere Arten schädigender Programme hinzu: Trojaner, Würmer, Spione und zuletzt Phishing-Attacken, oft als Nachrichten von Banken getarnte E-Mails, die Kontonummern und Passwörter arglos Benutzer abfragen (siehe Tabelle auf S. 98).

Noch hat Malware auf Mobiltelefonen keine großen Schäden angerichtet, doch sie könnte schnell gefährlicher werden und mehr Kosten verursachen als die existierenden Viren auf Büro- und Heimcomputern. Mögen unsere bisherigen Erfahrungen mit den Computerviren auch noch so ernüchternd sein, wir können daraus zumindest erahnen, wo die Programmierer der Smartphone-Viren demnächst zuschlagen werden.

Noch 1988, zwei Jahre nachdem der erste Virus auf einem PC auftauchte, unterschätzten viele Fachleute die drohende Gefahr – ein folgenreicher Irrtum. Auf ähnliche Weise sind heute die Smartphones durch mobile Malware gefährdet, und es scheint dringend geraten, so schnell wie möglich Schutzmaßnahmen zu ergreifen.

Sicherheitsexperten messen die Gefährdung durch Viren an ihrer Verbreitung, ihrer Vielfalt und ihrer Komplexität. Wie bei der Infektion einer Population von Menschen durch eine ansteckende Krankheit hängt die Verbreitung eines Computervirus vor allem von der Population potenzieller Träger sowie der Übertragungsrate ab. Bereits heute gibt es weltweit mehr als zwei Milliarden Mobiltelefone. Zwar sind die meisten dieser Geräte älteren Datums und verfügen über Betriebssysteme, die gegen Viren immun sind. Doch immer mehr Kunden steigen auf Smartphones um – und werden zu möglichen Opfern der Malware.

Per Knopfdruck in Sicherheit

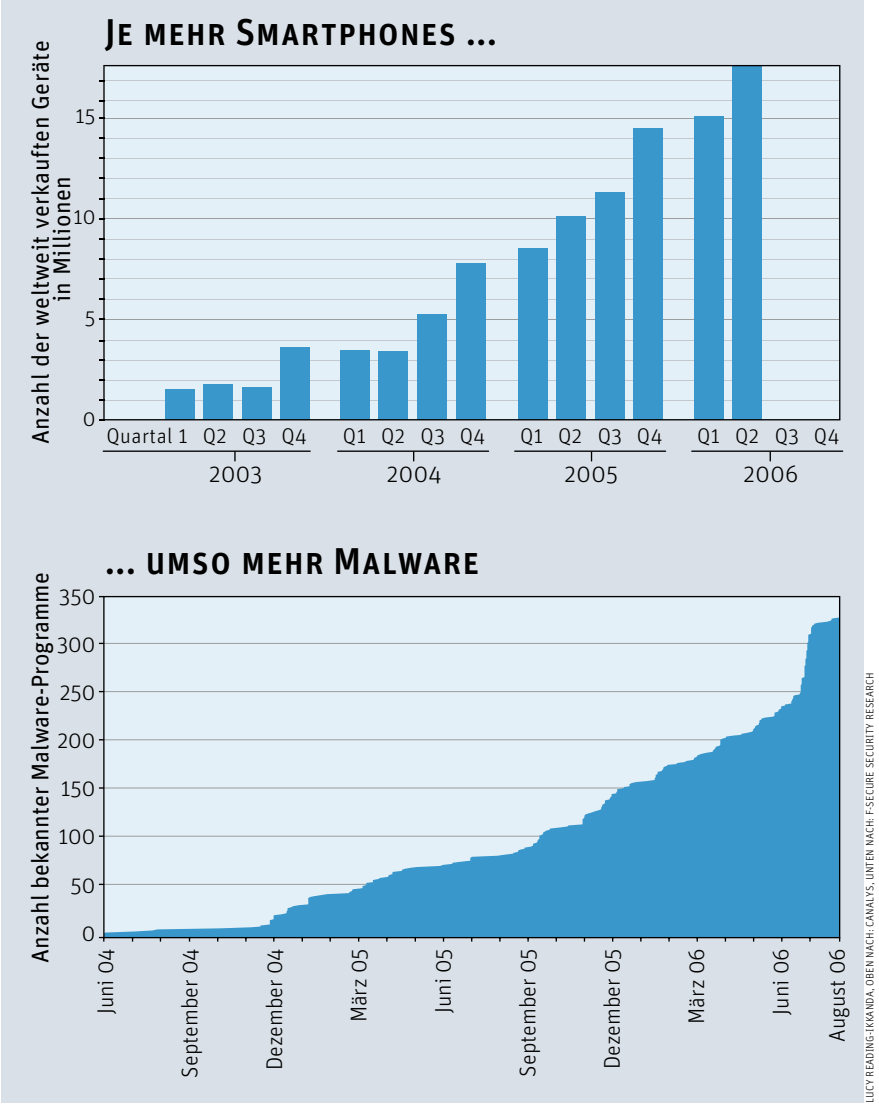
Dank Bluetooth können bestimmte Viren auf andere, empfindliche Mobiltelefone überspringen, sobald sich diese dem infizierten Gerät bis auf etwa zehn Meter nähern. So verbreitet sich mobile Malware wie ein Grippevirus. Wer mit einem infizierten Telefon unterwegs ist, kann eine Spur von Opfern zurücklassen. Jedes Ereignis, das viele Menschen anlockt, wird zur möglichen Brutstätte mobiler Malware. Während der Leichtathletik-Weltmeisterschaft in Helsinki im August 2005 verbreitete sich eine Variante von Cabir so schnell im Stadium, dass auf den großen Anzeigetafeln davor gewarnt werden musste.

Per Knopfdruck kann man die meisten Smartphones in einen Modus schalten, in dem sie zumindest vor den mit Kurzstreckenfunk übertragenen Computerwürmern geschützt sind, doch nur wenige Benutzer sind sich dieser Funktion bewusst. Auf einer Tagung über Computersicherheit führte ich neulich eine kleine Blitzumfrage unter den Zuhörern durch. Ergebnis: Bei jedem zwei-

In Kürze

- Mitte 2004 **infizierte sich erstmals ein Mobiltelefon** mit einem Computerwurm. Bald wurde deutlich, dass Smartphones, programmierbare Mobiltelefone mit breitem Anwendungsspektrum, ein Angriffsziel für Malware sind: zumeist bösartige, sich ohne Wissen oder Wollen der Computerbenutzer verbreitende Programme.
- **Mehr als 300 Formen der mobilen Malware** sind bereits bekannt, darunter Viren, Würmer, Trojaner und Spyware.
- Leiten Telefonhersteller, Netzbetreiber und Regierungen nicht bald radikale Schritte ein, entsteht womöglich **größerer Schaden als durch Viren und Würmer** auf Büro- und Heimcomputern.

Die Zahl der Smartphones ist in den letzten Jahren weltweit dramatisch angestiegen. Damit hat sich auch die Zahl der Angriffsziele für Malware vergrößert, was deren Urheber zu neuen, boshaften Schöpfungen provozieren dürfte. Fachleute erwarten, dass allein im Jahr 2009 etwa 200 Millionen Smartphones verkauft werden.



ten stand der Bluetooth-Zugang sperrangelweit für Viren offen. In der Öffentlichkeit ist dieser Anteil sicherlich noch viel höher.

Wurden Smartphones zuerst als teure Modelle für Geschäftsleute eingeführt, sind sie inzwischen auch für Privatkunden attraktiv und weisen von Modellreihe zu Modellreihe immer mehr Funktionen von PCs auf. Sie werden immer preiswerter, obwohl sie inzwischen auch als Videokamera dienen, als GPS-Gerät die satellitengestützte Positionsbestimmung ermöglichen und als MP3-Rekorder Musikdateien aufnehmen und abspielen können. Netzbetreiber unterstützen den Verkauf der Geräte, um mehr Kunden in die Welt der mobilen Kommunikation zu locken. Bereits 2005 wurden mehr als 40 Millionen Smartphones verkauft, bis 2009 könnten es jährlich 200 Millionen sein.

Vermutlich werden die Verkaufszahlen vor allem in Schwellenländern dramatisch ansteigen; dort gibt es bislang noch relativ wenige Computerbenutzer. Eine Untersuchung der englischen Technologieberatung Canalys ergab, dass die Verkaufszahlen für Smartphones in Osteuropa, Afrika und dem Nahen Osten im ersten Quartal 2006 doppelt so schnell anstiegen wie in Westeuropa.

Womöglich werden manche Entwicklungsländer ganz darauf verzichten, das Internet über Kommunikationsleitungen zugänglich zu machen, und gleich auf digitale Funknetze setzen, die man über ein Smartphone nutzen kann. Diese Netze sind viel einfacher zu errichten als teure Kabelnetze – dafür aber auch leichter zu überwachen und zu kontrollieren. Sollten sich diese Vorhersagen erfüllen, werden schon bald die meisten Computer Smartphones sein, und viele Menschen, die bis heute keinen Computer benutzten, werden im Internet surfen und mit ihren Mobiltelefonen Daten austauschen. Womöglich sind sie arglose Opfer für die mobile Malware.

Je größer der mögliche Schaden ist, desto stärker reizt es böswillige Programmierer, Viren in Umlauf zu bringen. Das ist eine Lehre aus der Verbreitung von Computerviren auf Büro- und Heimcomputern, auf denen das Betriebssystem Windows der Firma Microsoft besonders häufig installiert ist, das zum bevorzugten Angriffsziel der meisten Viren wurde. Aus demselben Grund ist das Mobiltelefon-Betriebssystem Symbian die größte Zielscheibe mobiler Malware. In Europa und Südostasien ist es auf etwa 70 Prozent der Smartphones installiert, darunter die Geräte der Firmen Nokia, Samsung, Sony Ericsson und Motorola. Die in Nordamerika populären Betriebssysteme WindowsMobile von Microsoft, PalmOS von der Firma Palm sowie Research in den BlackBerry-Laufwerken der Firma Motion werden hingegen seltener getroffen; auch die in Japan und Südkorea beliebten Programme auf der Grundlage des Betriebssystems Linux wurden bislang weit gehend verschont.

Angesichts dieser Gefahren sollten Telefonhersteller und Netzbetreiber nicht einfach abwarten, bis eine Virenepidemie über die Mobiltelefone hereinbricht. Besser wäre es, auf allen Smartphones Antivirenprogramme zu installieren und die »Monokultur« eines Betriebssystems durch ein vielfältiges »Ökosystem« zu ersetzen.

Im Lauf der Zeit mutiert die Malware zu neuen Programmen, die ein immer breiteres Softwarespektrum schädigen können – eine Entwicklung, die auch eine Vielfalt der Betriebssysteme nicht verhindern kann. Und die Gefahr wächst: Seit 2003 sind die meisten Malware-Programme nicht einfach nur ärgerlich, sondern dienen Versuchen, Geld zu ergaunern. Banden von Cyber-Kriminellen sind weltweit organisiert. Die ei- ▷

1×1 der Malware

Phishing Mails
Fälschungen von Internetseiten sowie E-Mails, die arglose Computerbenutzer zur Herausgabe von Passwörtern, Kontoständen und anderen privaten Informationen verlocken sollen

Spyware
Programme, die Lauschern geheime Informationen über Computersysteme oder deren Nutzer zuspielen

Trojanische Pferde
Vermeintlich nützliche Programme, die getarnt bösartige Funktionen erfüllen

Viren
Ursprünglich Programme, die sich in andere Programme einschleusen und vermehren, während die Wirtsprogramme laufen. Dienen heute auch als Oberbegriff, der Würmer und Trojanische Pferde beinhaltet

Würmer
Sich selbst reproduzierende Programme, die sich aktiv über ein Netzwerk verbreiten

▷ nen nutzen so genannte Crimeware, um Finanzdaten oder Geschäftsgeheimnisse zu klauen. Andere setzen »Botnets« ein – Roboter-Netzwerke, die Passwörter ausspionieren, Schutzlücken in Programmen suchen und zahlreiche Computer koordiniert angreifen können. Schließlich gibt es Erpresser, die Firmen drohen, deren Internetdienste oder E-Mail-Server zu zerstören – falls diese nicht zu zahlen bereit sind. In vielen Ländern werden die Kriminellen nicht überführt, weil den Behörden das Wissen, die Ressourcen oder der Wille fehlen, gegen sie vorzugehen.

Seitdem es möglich ist, mit Malware Geld zu ergaunern, sind Smartphones noch stärker gefährdet. Jedes Telefongespräch, jede E-Mail und jede MMS ist mit einer Geldüberweisung verbunden und im Gegensatz zu Heim- oder Bürocomputern besitzen alle Mobiltelefone ein eingebautes Gebührenabrechnungssystem. Tatsächlich gab es bereits einen Versuch, mit Malware darauf zuzugreifen: Ein Trojaner namens RedBrowser schickt einen ununterbrochenen Strom von Textmitteilungen infizierter Mobiltelefone an einen Telefonanschluss in Russland – bis die Verbindung unterbrochen wird. Für jeden Text werden etwa vier Euro vom Konto des bedauernswerten Besitzers abgebucht. Manche Netzbetreiber zeigen keine Gnade und fordern horrende Gebühren ein – zum Glück westeuropäischer Kunden richtete RedBrowser bislang nur an einigen Orten in Russland Schaden an.

Derweil bieten Firmen in Nordamerika ihren Kunden bereits an, per Mobiltelefon Geldüberweisungen abzuwickeln. Über PayPal, eine Firma für elektronische Zahlungssysteme, kann man mit dem Mobiltelefon bezahlen. Auch Programmierer mobiler Malware werden sich sehr bald dafür interessieren. Es wird sie begeistern, dass man mit Smartphones E-Mails verschicken und empfangen kann – das prädestiniert sie als mobile Spam-Schleudern. Spyware ist eine weitere Gefahr: Programme, die das Benutzerverhalten von Computeranwendern ausspionieren und an Dritte weiterleiten. Ein bereits existierendes Beispiel dafür ist FlexiSpy, welches die mit einem Mobiltelefon gewählten Nummern speichert und regelmäßig an einen beliebigen Empfänger sendet. Es ist nicht per Funk übertragbar und deshalb nicht allzu gefährlich.

Da neue Mobiltelefone es erlauben, Gespräche auch aufzuzeichnen, könnten zukünftige Viren diese zumeist persönlichen Daten unerwünscht an Dritte verschicken – ein weiterer dramatischer Einbruch in die Privatsphäre argloser Telefonbenutzer.

Überraschend ist, dass keine der mehr als 300 Arten mobiler Malware existierende Sicherheitslücken oder Fehler in der Software von Mobiltelefonen ausnützt, denn auf Heim- und Bürocomputern breiten sich Viren und Trojaner seit Langem vor allem auf diese Weise aus. Stattdessen verbreiten sich mobile Malware-Programme meist im Dialog mit arglosen Opfern, etwa indem sie Nutzer von Mobiltelefonen dazu verlocken, der Installation vermeintlich harmloser Programme zuzustimmen. Manche tarnen sich als nützliche Funktionen oder als harmlose Spiele, während sich andere – wie der eingangs erwähnte Cabir und CommWarrior – Benutzern über Bluetooth-Verbindungen geradezu aufdrängen.

Sehenden Auges in die Gefahr

Manche Telefonbesitzer stimmen der Übertragung der getarnten Malware zu, selbst wenn ihr Telefon sie davor warnt, dass sich hinter der angeblich harmlosen Nachricht womöglich eine Gefahr verbirgt und sie deren Annahme durchaus verweigern könnten. Wie schon andere Sicherheitsexperten habe auch ich Opfer danach gefragt, warum sie in die Falle tappten. Viele hatten die Nachricht des unbekannten Absenders zunächst abgelehnt – doch ohne Erfolg, weil ein Computerwurm ein »Nein« als Antwort nicht anerkennt und penetrant seine Frage wiederholt.

Nur selten reicht die Zeit, um sich vor der Malware zu schützen, indem man die Bluetooth-Verbindung unterbricht. Kaum einem der bedrohten Smartphone-Besitzer fällt rechtzeitig ein,

Bestiarium der mobilen Malware

Name (Entdeckungsdatum)	Typ und Verbreitungsart	Wirkung
Cabir (Juni 2004)	Wurm verbreitet sich über Bluetooth-Verbindungen und kopiert sich selbst	Fortwährende Suche nach neuen Bluetooth-Verbindungen leert die Batterie.
CommWarrior (März 2005)	Wurm verbreitet sich über Bluetooth-Verbindungen, verschickt sich selbst als MMS an Nummern im Adressbuch und antwortet automatisch auf eingehende SMS- und MMS-Nachrichten; kopiert sich selbst auf mobile Speicherkarten und schleicht sich auf dem Smartphone in Installationsdateien anderer Programme ein	Manche Netzbetreiber berechnen für jede gesendete MMS-Datei, die den Wurm enthält, eine Gebühr. Einige Varianten des Wurms blockieren die Funktion des Mobiltelefons vollständig.
Doomboot (Juli 2005)	Trojanisches Pferd gibt vor, eine Version des Computerspiels »Doom 2« zu sein; verlockt Benutzer, es herunterzuladen und zu installieren	Mobiltelefon kann Betriebssystem nicht laden, Cabir und CommWarrior werden installiert.
RedBrowser (Februar 2006)	Trojanisches Pferd täuscht vor, so genannte WAP-Seiten ohne eigenen WAP-Zugang zu öffnen und damit auch bei relativ langsamer Datenübertragung auf Inhalte aus dem Internet zugreifen zu können	sendet heimlich Textnachrichten an eine Telefonnummer in Russland. Pro Nachricht werden etwa 4 Euro vom Konto des arglosen Telefonbenutzers abgebucht.
FlexiSpy (März 2006)	Spyware wird auf Mobiltelefonen aktiv installiert; wurde in Thailand entwickelt und kommerziell vertrieben, um bei anstehenden Scheidungen Beweismaterial gegen fremdgehende Ehepartner zu sammeln	schickt Protokoll gewählter Telefonnummern sowie Kopien von Text- und MMS-Nachrichten an einen kommerziellen Internetdienst, dieses kann von Dritten abgerufen werden

sich aus der Reichweite infizierter Smartphones zu begeben; da Bluetooth-Verbindungen nur wenige Meter reichen, genügen meist ein paar Schritte, um in Sicherheit zu gelangen.

Ohne Zweifel: Wir brauchen dringend eine konzertierte Aktion gegen die mobile Malware, damit diese nicht zu einer Epidemie wird, die Smartphones zur Gefahr macht. Mit Antivirenprogrammen lassen sich Mobiltelefone immunisieren und desinfizieren. Firewall-Programme warnen Nutzer, wenn ein darauf installiertes Programm versucht, eine Verbindung zum Internet zu öffnen. Zwar bemühen sich manche Netzbetreiber bereits heute, die Mobilfunk-Standards GPRS und UMTS zu filtern – einige überprüfen bereits jetzt alle MMS-Nachrichten auf Malware –, doch ist das so genannte Wi-Fi-Netz, das viele Smartphone-Nutzer als Weg ins Internet verwenden, heute noch weit gehend ungeschützt.

Einige Telefonhersteller wollen nun einen Standard für elektronische Schaltkreise einführen, der es mobiler Malware erschweren soll, auf die Speicher der Smartphones zuzugreifen und von dort Daten zu entführen. Vor Kurzem führte das Symbian-Konsortium eine neue, vorerst sichere Version seines Betriebssystems ein. Damit kann fremde Software auf Smartphones nur noch installiert werden, wenn deren Urheber über ein von Symbian ausgestelltes Zertifikat verfügt.

Auch wenn Mobiltelefone auf diese Weise vor der gesamten derzeit bekannten Malware geschützt wären, suchen Sicherheitsexperten – und vermutlich auch die Programmierer von Viren, Würmern und Trojanern – bereits nach neuen Schlupflöchern. ◁

Mikko Hypponen leitet die Forschungsabteilung der Sicherheitsfirma F-Security in Helsinki, die Telefonhersteller und Netzbetreiber berät. Er hat bereits das FBI als polizeiliche Ermittlungsbehörde des US-Justizministeriums beraten sowie den US-Geheimdienst und Scotland Yard in Großbritannien.

Detection of intrusions and malware, and vulnerability assessment. Von Roland Büschkes und Pavel Laskov (Hg.). Springer Verlag 2006

Mobile phones as computing devices: The viruses are coming! Von David Dagon, Tom Martin und Thad Starner. In: IEEE Pervasive Computing, Bd. 3, Nr. 4, S. 11, 2004

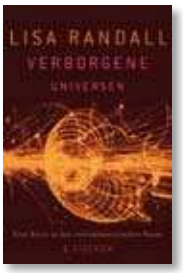
Spyware, viruses, and malware. Von Ed Tittel. John Wiley and Sons, Chichester 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/861619.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

PHYSIK

Die Erklärung der Welt mit dem gewissen Extra



Vielleicht leben wir ja wirklich in einer vieldimensionalen Welt – und die zusätzlichen Dimensionen sind noch nicht einmal mikroskopisch klein.

Kaluza-Klein-Teilchen … kann man mit den Hosen heutiger männlicher Teenager vergleichen, die so sackartig wie möglich sein müssen, ohne hinunterzurutschen.« Wer schreibt so interessant und flapsig zugleich? Und wieso sollen Teilchen, die von theoretischen Physikern postuliert wurden, etwas mit der Teenie-Mode zu tun haben?

Wer es wissen will, dem sei Lisa Randalls Buch »Verborgene Universen« empfohlen. Der Titel klingt zwar genauso wie die der unzähligen Bücher, welche die Geheimnisse des Kosmos, der Zeit oder der Relativitätstheorie zu entschlüsseln versprechen und das Versprechen dann nicht einhalten. Aber weit gefehlt: Die Harvard-Physikerin Lisa Randall präsentiert anständige Physik, und ihre Weltmodelle werden in der Wissenschaftsgemeinde ernsthaft diskutiert.

Ihre »extradimensionalen Theorien« sind für Teilchenphysiker sehr attraktiv; denn möglicherweise können sie eines Tages erklären, warum die Massen der Elementarteilchen die gemessenen Werte haben. Außerdem lässt sich die Gravitation mit in die Theorie einbinden – was schwierig ist, da die Schwerkraft sehr viel schwächer ist als die drei anderen Grundkräfte des Standardmodells der Physik. Grob gesprochen kann man in extradimensionalen Theorien die Gravitation in mehr Dimensionen wirken lassen als die anderen Kräfte. Sie ist dann ungefähr gleich stark wie ihre drei Schwestern, verteilt sich aber auf mehr Dimensionen und sieht deswegen in unserem dreidimensionalen Teilraum sehr schwach aus.

Während man bislang davon ausging, dass zusätzliche Raumdimensionen sehr klein und gewissermaßen zusammengerollt sein müssten, konnten Randalls Arbeiten das Gegenteil beweisen. Extradimensionen könnten groß sein.

Besonders betont die Autorin, dass ihre Theorien empirisch überprüfbar sind, wie es sich für eine wissenschaftliche Theorie gehört. Und im Gegensatz zu bisherigen Stringtheorien, deren Verifizierung utopisch hohe Energien erfordern würde, ist diese Überprüfbarkeit nicht nur theoretischer Natur. Wenn die Idee der großen Extradimensionen korrekt ist, müsste der bald in Genf in Betrieb gehende Large Hadron Collider (LHC) Anzeichen dafür finden. Aus diesem Grund werden Randalls Ideen heiß gehandelt.

Die Reise in den extradimensionalen Raum beginnt – wie so häufig bei populärwissenschaftlichen Büchern – mit einer Einführung in Relativitätstheorie und Quantenmechanik. Diese Kapitel sind zwar frei von Fehlern, aber bestimmt nicht die beste Einführung in die Physik des frühen 20. Jahrhunderts. Die Erklärung »genau wie ein Zentimeter unterschiedliche Entfernungen repräsentieren kann« muss man sich zurechtinterpretieren in die Aussage, dass Maßeinheiten gesetzte Konventionen sind. Ähnlich nutzlos bleibt ein Vergleich der Quantenstatistik mit der Auszählung der Stimmen in Florida bei der Wahl des US-Präsidenten, denn der eigentliche Punkt verschwindet in Polemik. Eher geschmacklos ist dagegen der Vergleich eines Schwarzen Lochs mit den Reisemöglichkeiten von Frauen in Saudi-Arabien.

Lisa Randall findet aber auch sehr anschauliche Erklärungen, etwa wenn man Massen in Elektronenvolt angibt und dabei implizit Einheiten umrechnet. Sie bemerkt richtig, dass das im Grunde nichts anderes ist als zu sagen, der Bahnhof sei zehn Minuten entfernt. Dieses Beispiel stammt aus den mittleren Kapiteln des Buchs, in denen die Autorin das Standardmodell der Teilchenphysik erläutert. Dieser Teil ist eine lesenswerte Zusammenfassung der aktuellen Forschung, mit Blickrichtung auf die folgenden Kapitel über Extradimensionen. Stringtheorien, Higgs-Teilchen und Große Vereinheitlichung werden geschickt eingeführt und als viel versprechende Konzepte vorgestellt. Am Ende dieser Kapitel ist der Leser davon überzeugt, wie wichtig der Bau des LHC ist.

Die letzten 120 Seiten des 550 Seiten starken Werks widmet Lisa Randall dann den zusätzlichen Dimensionen. Sie stellt viele Modelle vor, wirbelt mit den kurz zuvor eingeführten Begriffen und dürfte die meisten Leser hier abhängen. Vermutlich wäre es besser gewesen, einfach weniger Weltentwürfe zu diskutieren. Natürlich können nicht alle Ideen in diesen Kapiteln gleichzeitig für die echte Welt relevant sein, und wenn der LHC seine Arbeit aufnimmt, wird sich bald zeigen, ob überhaupt irgendein Vorschlag der Autorin die Welt korrekt beschreibt.

Die Übersetzung des englischen Physikerslangs ins Deutsche ist nicht besonders gut gelungen. So klingt der Ausdruck »Schwachbrane« (im Original »*weak brane*«) wirklich merkwürdig für den niederdimensionalen Unterraum, in dem die elektroschwachen Kräfte wirken. Und was heißt »Tuhdieland«? Erst wer es ausspricht und mit englischen Ohren hört (»2-D-Land«), kommt dahinter.

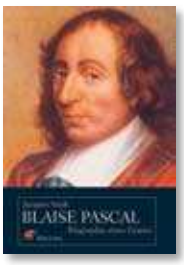
Stefan Gillessen

Der Rezensent ist Postdoc am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.

Lisa Randall
Verborgene Universen
Eine Reise in den extradimensionalen Raum
Aus dem Amerikanischen von Hartmut Schickert. S. Fischer, Frankfurt am Main 2006. 550 Seiten, € 19,90

BIOGRAFIE

Vom Binomialkoeffizienten bis zur Jesuitenschelte



Ironie des Schicksals: Was Pascal als mehr oder weniger belanglosen Zeitvertreib betrieb, gilt heute als seine größte Leistung – und umgekehrt.

Eine Biografie über Blaise Pascal (1623–1662) scheint überfällig gewesen zu sein. Das letzte Werk über ihn erschien 1986 (Francis X. J. Coleman: »Neither angel nor beast«); und am deutschen Markt sind mir seitdem nur zwei Werke aufgefallen, die sich allerdings auf Pascals christliches Bewusstsein und seine Gotteserkenntnis beschränken.

Der heutige Gymnasiast begegnet Blaise Pascal durch die Rechenregel des »Pascal'schen Dreiecks«, aus der sich die Koeffizienten der Entwicklung von $(a+b)^n$ ableiten. Der Physikstudent lernt ihn als Pionier der Hydrostatik kennen, der das Gesetz der kommunizierenden Röhren erkannte, als Erster Barometer zur Höhenmessung nutzte und nach dem heute die Einheit des Drucks benannt ist. Mathematiker würdigen ihn als Begründer der projektiven Geometrie, als einen der Schöpfer von Wahrscheinlichkeitsrechnung und Kombinatorik, ja auch – neben Newton und Leibniz – als Mitentwickler von Differenzial- und Integralrechnung. In der Philosophie berufen sich Kierkegaard und Nietzsche auf ihn. In Frankreich gilt er jedoch vor allem als der größte religiöse neuzeitliche Denker und als größter Schriftsteller der klassischen Prosa.

Der landesüblichen Sichtweise entsprechend widmet sich die – im Original bereits 2000 erschienene – Biografie des Franzosen Jacques Attali überwiegend den geistesgeschichtlichen, politischen und religiösen Aspekten von Pascals Leben und Werk. Der in Algier geborene Wirtschaftswissenschaftler Attali ist als Berater des französischen Staatspräsidenten François Mitterrand bekannt und prominent geworden, bevor er sich vom Élyséepalast und weiteren Spitzenämtern zurückzog und schließlich ganz dem Schreiben philosophischer und biografischer Bücher widmete.

Vom mathematischen und physikalischen Werk Pascals, das uns heute am bedeutendsten erscheint, erfahren wir dagegen nur am Rande. Während in Mitteleuropa bereits der Dreißigjährige Krieg tobt, verschafft der Vater über seinen Freund, den Pater Marin Mersenne, dem Wunderkind Zugang zur gerade gegründeten Akademie von Paris, wo er in die Kreise um Descartes und Fermat eingeführt wird. Im September 1639 tritt der 16-Jährige selbst ans Pult und hält einen Vortrag über Kegelschnitte. Doch damals ist wissenschaftliches Publizieren noch unüblich. Von Pascals erstem Geniestreich bleiben nur wenige Fragmente erhalten, die erst ein Jahrhundert später von Leibniz veröffentlicht werden.

Mit gerade 18 Jahren verblüfft Pascal erneut die Welt. Er baut eine Rechenmaschine, mit der man sechsstellige Zahlen addieren kann, und beschäftigt sich mit dem alten Rätsel des Vakuums. Aufbauend auf Vorarbeiten von Evangelista Torricelli (1608 – 1647) demonstriert er in einem öffentlichen Versuch, dass in einer Glasröhre die Höhe der Quecksilbersäule nur vom Gewicht der Luft oberhalb der Anordnung abhängt und in dem Leerraum der Röhre ein Vakuum herrscht. Der antike »horror vacui« ist damit erledigt. Diese Experimente und Gedanken publiziert Pascal 1653 in einer Schrift über den Luftdruck und die Hydrostatik.

Bald darauf engagiert er sich in einer kirchlichen Fehde. Vehement ergreift er die Partei des holländischen Reformbischofs Cornelius Jansen (1585 – 1638), der eine an Augustinus orientierte Gnadenlehre vertrat. In einer Serie von satirisch-polemischen Streitschriften, die unter konspirativen Umständen anonym als »Briefe in die Provinz« gedruckt werden, versucht er die Jesuiten lächerlich zu machen. Die 18 Briefe gelten bis heute, vor allem wegen ihrer Klarheit und Präzision, als ein Meisterwerk französischer Prosa. Attali führt den Leser durch die Verstrickungen dieses für Pascal immer auch gefährlichen Kirchenkampfs, bei dem man heute kaum mehr begreift, worum es eigentlich ging.

Unglaublich, wie Pascal parallel zu diesen Disputen seine Ideen zur Wahrscheinlichkeitsrechnung weiter vorantreibt, etwa in einem Briefwechsel mit einem Richter in Toulouse namens Pierre de Fermat (1601 – 1665), den die Nachwelt als Mathematiker kennt. Auch davon blieben nur wenige Briefe erhalten.

Überrascht hat mich in Attalis Biografie, dass Pascal nebenbei auch als der Begründer des ersten öffentlichen Nahverkehrs gelten darf. Zusammen mit einigen Adligen gründete er eine Personengesellschaft, die in Paris eine Postkutschenlinie für die weniger Begüterten unterhielt. Die Firma war so erfolgreich, dass alsbald weitere Linien dazukamen, und hielt sich immerhin 17 Jahre lang. Seine Einkünfte aus dem Geschäft vermachte Pascal den Armen.

Als der ständig kränkelnde Pascal immer häufiger bettlägerig war und andauernd unter heftigen Schmerzen litt, sagten ihm die Ärzte noch bis in die letzten Lebenswochen, dass es ihm eigentlich an nichts fehle und er Molke trinken solle. Er starb mit 39 Jahren, mitten in der Arbeit an einer großen Abhandlung über die Rechtfertigung des Christentums.

Den fahrlässigen Umgang mit Pascals Nachlass blättert Attali in bisweilen erschütternden Details auf. Immerhin: Sein religiöses Hauptwerk, die »Pensées«, wurde von Freunden aus einem Berg von rund tausend Zetteln in ein druckbares Buch verwandelt, wenn auch in einigen Ausgaben zunächst kräftig bereinigt. Aber viele seiner mathematischen Schriften, die Pascal nicht veröffentlichte, sondern nur einigen Forschern wie Huygens oder Leibniz brieflich mitteilte, wurden von den Nachlassverwaltern als unwichtig angesehen, verschlampt oder einfach weggeworfen, so auch der Briefwechsel mit Fermat.

Im Kloster Port-Royal-des-Champs konstruierte Pascal eine Winde über einem 60 Meter tiefen Brunnen, mit der ein zwölfjähriger Junge etwa 140 Liter Wasser auf einmal heraufziehen konnte.

Jacques Attali ist ein fleißiger und in jedem Sinne erschöpfender Biograf: Er konfrontiert den Leser mit allzu vielen Personen und zitiert im Übermaß aus zahllosen Schriften. Leider fehlt ein Sachregister. Dennoch wird Blaise Pascal als Mensch sichtbar, der in mehreren Parallelexistenzen gewaltig auf seine Zeit einwirkte: als Physiker und Mathematiker eher im Verborgenen, als streitbarer Polemiker aber geliebt und gefürchtet, der sich – zumeist krank, schwermütig und asketisch lebend – vor allem der Sache des Glaubens verschrieb. Dass er der Nachwelt ganz anders in Erinnerung blieb, erscheint mir wie eine Ironie des Schicksals.

Reinhard Breuer

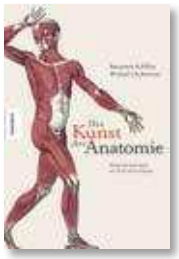
Der Rezensent ist Physiker und Chefredakteur von Spektrum der Wissenschaft.

Jacques Attali
Blaise Pascal
Biographie eines Genies
Aus dem Französischen von Hans Peter Schmidt. Klett-Cotta, Stuttgart 2006. 469 Seiten, € 29,50

ANATOMIE

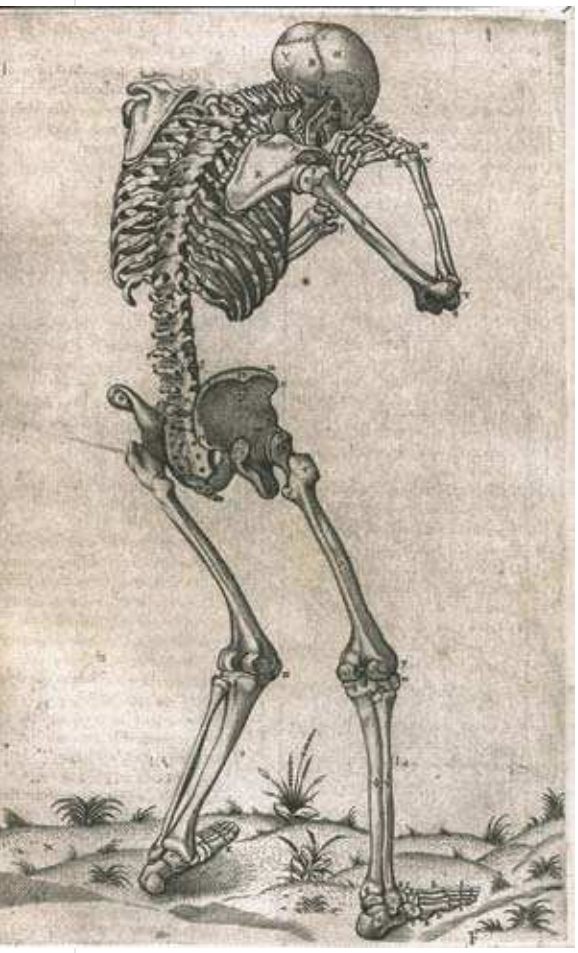
Kunst oder Wissenschaft?

Falsche Frage. Die Zusammenschau beider Aspekte wäre interessant gewesen, wird aber von diesem Buch nicht geleistet.



Die 1543 erschienene Arbeit »De humani corporis fabrica« des flämischen Anatomen Andreas Vesalius (1514 – 1564) war in mehrfacher Hinsicht eine Revolution. Zum einen gründete erstmals seit den Zeiten des Galen von Pergamon (129 – 216) ein Lehrbuch der Anatomie nicht auf der Überlieferung, sondern auf dem mit eigenen Augen Gesehenen und eigenhändig Zergliederten. Die Sektion menschlicher Leichname widerlegte eine Reihe von Galens Befunden und offenbarte, dass dieser seine Kenntnisse von Affen, Schweinen, Schafen und Ziegen, nicht aber von Menschen gewonnen hatte.

Zum anderen trat in der »Fabrica« mit der Autopsie die visuelle Darstellung neben den Text. Über die Anatomie von Gefäßbahnen und Muskelsträngen hinaus sind die anatomischen Abbildungen des 16. Jahrhunderts Teil der visuellen Kultur der italienischen Renaissance. Der niederrheinische Künstler Jan Stephan von Kalkar (1499 – circa 1546/50), der für Vesalius arbeitete, hatte zur Werkstatt des Tizian in Venedig gehört. Seine Tafeln geben nicht nur ein Bild des Körpers, sondern sind zum Beispiel auch klassische Vanitasdarstellungen – wenn etwa ein Skelett, gestützt auf ein Postament mit der Inschrift »Vivitur ingenio, caetera mortis erunt« (»Man lebt durch den Geist, alles andere ist sterblich«), einen Schädel sinnierend anblickt. Der Tote trauert hier über sein verlorenes Leben.



Der sezierte Leib als Pose findet sich bis in das 18. Jahrhundert hinein in den einflussreichen »Tabulae sceleti et musculorum corporis humani« (1747) des Leidener Anatomieprofessors Bernhard Siegfried Albinus (1697 – 1770). Das vielleicht berühmteste Bild dieses Werks zeigt ein Skelett mit ausgestrecktem linkem Arm vor einem Rhinozeros im Hintergrund. Zum letzten Mal stellt hier ein Anatomiebuch zum sezierten Leib eine Landschaft so prominent dar.

Mit Albinus' Werk hält auch eine neue Präzision Einzug in die anatomische Darstellung. Albinus und sein Zeichner und Stecher Jan Wandelaar (1690 – 1759) fertigten die Abbildungen mit Hilfe zweier Maschennetze, die in genau festgelegtem Abstand zu dem darzustellenden Skelett aufgespannt wurden. So konnten sie die aus der Nähe betrachteten Details mit größerer Präzision in die Abbildung des Gesamtkörpers übertragen. Ein weiteres technisches Hilfsmittel zur Sicherung der Korrektheit, das im 18. Jahrhundert breiten Einsatz fand, war die Camera obscura.

Jan Wandelaar war unter anderem bei Gérard de Lairesse (1640 – 1711) in die Lehre gegangen, der seinerseits von Rembrandt ausgebildet worden war. Entsprechend stehen seine Zeichnungen in der Tradition der niederländischen Stilllebenmalerei sowie der Kunst- und Kuriositätenkabinette. Das gilt auch für das um 1700 in Amsterdam erschienene Werk von Govard Bidloo (1649 – 1713), für das de Lairesse gearbeitet hatte: die »Ontleding des menschelyken lichaams«. Auch der »Thesaurus anatomicus primus« des Frederik Ruysch (1638 – 1731) zeigt nicht zufällig skelettierte Föten mit Perlenketten und Stillleben von Bronchien und Darmgekröse: Ruysch hatte nicht nur ein in seiner Zeit berühmtes Naturalienkabinett angelegt, seine Tochter Rachel war eine begabte Stillleben- und Blumenmalerin.

Dieses Skelett ließ der Spanier Juan Valverde de Amusco (etwa 1525 – 1588) nach einem Vorbild aus Vesalius' »De humani corporis fabrica« stechen.

Dieser Verbindung von Kunst und Wissenschaft gegenüber erscheint das 19. Jahrhundert mit seinem an der Präzision geschulten Blick eher nüchtern. Wissenschaft musste nicht nur akkurat sein, der Wissenschaftler sollte sich selbst so weit wie möglich aus dem Erkenntnisprozess zurückziehen, um die Natur für sich selbst sprechen zu lassen. Das zeigt sich in der neuen Ästhetik der Bilder: Das Inventar verschwindet, die einzelnen Körperteile beherrschen das Bild und werden mit bis dahin nicht gekannter Präzision dargestellt – so etwa in dem »Topographisch-anatomischen Atlas« des Leipziger Anatomen Christian Wilhelm Braune (1831 – 1892). Seine Querschnittsdarstellung des Körpers nimmt die moderne Technik der Computertomografie vorweg.

Das ist eine spannende Geschichte; aber der vorliegende Band erzählt sie nur sporadisch. Einige der wichtigsten neueren Arbeiten zum Thema bleiben ungenutzt. Vor allem legen der Kunsthistoriker Rifkin und der Medizininformatiker Ackerman ein Buch vor, das von Kunst *und* Anatomie handelt, nicht aber von der Kunst *der* Anatomie. Während sich die moderne Wissenschaftsgeschichte in den letzten Jahrzehnten bemüht hat, hinter die Trennung von Wissenschaft und Kunst als zwei vermeintlich unterschiedlichen Sphären zurückzugehen – hier Anschauung, dort Logik, hier intuitives, dort systematisches Wissen, hier Erfindung, dort Entdeckung –, bleiben in diesem Band beide Bereiche unvermittelt nebeneinander stehen.

Das spiegelt sich im Aufbau des Buchs. Zu Beginn beleuchtet Rifkin die Bildproduktion der Anatomie vornehmlich unter kunsthistorischen Gesichtspunkten. Den Hauptteil des Buchs bilden 19 Kapitel, die anatomische Werke chronologisch vom 16. bis zum Ende des 19. Jahrhunderts vorstellen. Zum Schluss skizziert Ackerman, nunmehr allein unter dem Gesichtspunkt der medizinischen Funktionalität des anatomischen Bilds, dreidimensionale Visualisierungen des Leibes mit den Mitteln der modernen Computertechno-

logie. Diese Ordnung scheint eine einfache Fortschrittsthese zu implizieren: von der Kunst zum medizinisch gesicherten Wissen, von der Fläche des Bilds zum computeranimierten Körper, von der Hand des Malers zur Mathematik des Technikers.

Dabei bleibt eine Reihe interessanter Fragen ungestellt. Wie und warum tritt der Körper in den fünf Jahrhunderten, die hier betrachtet werden, als ein sichtbares Objekt hervor? Welcher Art ist die Kultur, die den zergliederten Körper in den Blick nimmt und ihn einmal als Kunst, das andere Mal aber auch als Anatomie bezeichnet? Welches Wissen produzieren die anatomischen Tafeln – als Kunst und Wissenschaft gleichermaßen?

Das Buch von Rifkin und Ackerman wendet sich weder an ein wissenschafts- oder medizinhistorisches Fachpublikum (es fehlen Fußnoten und Verweise auf weiterführende Literatur), noch nimmt es einen dezidiert kunsthistorischen Standpunkt ein – wie etwa Martin Kemps Katalog zur Ausstellung »Spectacular Bodies«, die auch zeitgenössische Kunstwerke zeigte und das Vertrauen des Betrachters in die einfache Zuschreibung der Exponate zu Kunst oder Wissenschaft irritierte. Stattdessen bleiben die Bilder sich selbst überlassen – die sind allemal faszinierend genug, aber der Leser hätte sich doch etwas mehr gewünscht.

Janina Wellmann

Die Rezensentin schließt derzeit ihre Promotion am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin ab.

Benjamin A. Rifkin, Michael J. Ackerman; Judy Folkenberg (Biografien)

Die Kunst der Anatomie

Körperdarstellungen aus fünf Jahrhunderten

Aus dem Englischen von Ursula Fethke (Text) und Sibylle Tönjes (Bildunterschriften). Knesebeck, München 2006.
344 Seiten, € 34,95

MEDIZIN

Vergebliche Mühe

Der Kampf gegen Betrug und Selbstbetrug ist aller Ehren wert; er müsste nur mit den richtigen Mitteln geführt werden.

Das Geschäft mit der Hoffnung läuft in der Krebsmedizin besonders gut. Mehr als 420 000 Menschen erkranken in Deutschland pro Jahr an Krebs, und die Mehrzahl von ihnen wird früher oder später mit alternativen Therapieangeboten konfrontiert. Diese können im günstigsten Fall als »sanft«, aber meist als wirkungslos eingestuft werden. In nicht wenigen Fällen steckt dahinter glatter Betrug, und viele vermeintlich »biologische« Maßnahmen sind voller Risiken.

Attraktiv für Krebspatienten bleiben sie trotzdem: Je nach Studie und Art der Befragung schwankt der Anteil Betroffener, die zusätzlich zu den als »Schulmedizin« bezeichneten Standardverfahren auch zu unkonventionellen Mitteln greifen, zwischen weniger als 10 und 80 Prozent. Dies ergab eine Auswertung des von der EU-Kommission geförderten europaweiten Projekts CAM-Cancer (»*Concerted Action for Complementary and Alternative Medicine Assessment in the Cancer Field*«, www.cam-cancer.org).

In diesem Spannungsfeld will Michael Spöttel Aufklärungsarbeit leisten. Der Ethnologe und Soziologe handelt am Beispiel einer Reihe ausgewählter Therapieverfahren und ihrer Anbieter das Thema Alternativmedizin und Krebs ab.

Spöttel geht das Thema kritisch, mutig und aus persönlicher Betroffenheit heraus an, auch wenn man seine Erfahrungen als Freund und Angehöriger erst spät im Verlauf der Lektüre zu ahnen beginnt. Er steigt tief in die Historie so bekannter Schulen wie der Steiner'schen Anthroposophie ein, entlarvt den romantischen Ansatz und idealisierenden Mythos von der Natürlichkeit vieler Verfahren und stellt ihnen moderne naturwissenschaftlich fundierte Fakten gegenüber. Über den eher schlichten Dualismus, die »naive Unterscheidung zwischen Gut und Böse«, die sich wie ein roter Faden durch die unkonventionelle Medizin ziehe, kann er sich ebenso erregen wie über die politischen Aktivitäten einiger besonders populärer Vertreter der Alternativmedizin aus jüngerer Zeit.

Trotz großen Fleißes beim Zusammentragen von Negativbeispielen, trotz seiner ▷

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Wissen aus erster Hand

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Die Redaktion von spektrum**direkt** informiert Sie online schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrum**direkt**.de/info

▷ Furchtlosigkeit in der Bewertung mancher Heiler: Spöttel scheitert an mangelnder Souveränität im Umgang mit dem Instrumentarium der (Natur-)Wissenschaften. Seine spannenden Analysen der Attraktivität unkonventioneller Angebote und seine profunden Kenntnisse der Wissenschafts- und Medizingeschichte können dieses Defizit nicht wirklich wettmachen.

So nutzt Spöttel vergleichsweise wenige naturwissenschaftlich-medizinische Originalquellen; manchmal beruft er sich auch nur auf solche, ohne sie genauer und nachvollziehbar zu benennen. Dies rückt seine Aussagen – ob zutreffend oder nicht – in die Nähe des alten Kinderlieds »Die Wissenschaft hat festgestellt«. Manchmal, wie beim Thema »Elektrosmog als Krebsrisiko«, ist Spöttel nicht auf dem aktuellen Stand, was der hochkomplexen Diskussion um diesen nach wie vor nicht endgültig einschätzbaren Risikofaktor nicht weiterhilft. Überwiegend zitiert der Autor Fakten aus populärwissenschaftlichen Werken und vor allem Medienberichten und packt zudem eigene, durchaus emotional gefärbte Kommentare hinzu.

Möglicherweise ist es die persönliche Betroffenheit, die dem Buch die notwendige Neutralität nimmt und zur Subjektivität schon bei der Auswahl der Themen und Quellen verleitet. Vor allem im letzten Drittel des Buchs wird deutlich spürbar, dass die Verarbeitung eigener Erfahrungen den Blickwinkel des Autors bestimmt. Zeitungsartikel und andere bereits von Journalisten gefilterte Informationen sind zur Untermauerung von Spöttels Aussagen aber eine zu dürftige Quelle, wenn es um Anbieter wie den selbst ernannten Vitaminguru Matthias Rath oder den Arzt Ryke Geerd Hamer und seine Germanische Neue Medizin geht, die keine Scheu davor haben, Kritiker unter Ausschöpfung aller juristischer Möglichkeiten zum Schweigen zu bringen.

Das Buch ist als Studie zum Phänomen Alternativmedizin lesenswert, aber in vielen Punkten nicht verlässlich genug, um tatsächlich eine Unterstützung bei der Bewertung der beschriebenen Angebote der Krebstherapie zu bieten.

Birgit Hiller

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin. Sie arbeitet im Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg.

Michael Spöttel
Vergebliche Hoffnung
Der Mythos von sanften und natürlichen Krebstherapien

Alibri, Aschaffenburg 2006.
158 Seiten, € 13,–

PREISRÄTSEL

Wie alt bin ich?

Von Helmut Karcher

Auf die Frage nach seinem Alter antwortete ein Mathematiker: »Ich war am $x.y.$ x^2y^2 genau xy Jahre alt. Ein nach mir (nicht am gleichen Tag) Geborener kann dies frühestens in genau 165 Jahren von sich sagen.«

Wie lautet das Geburtsdatum des Mathematikers? An welchem Datum hat er diese Aussage gemacht?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg oder per E-Mail an preisraetsel@spektrum.com. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zweimal das Buch »Lernen« von M. Spitzer. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 13. 02. 2007, eingehen. Unsere Preisrätsel finden Sie auch im Internet unter www.spektrum.de/preisraetsel.

Lösung zu »Rechenalbtraum« (Dezember 2006)

Die fehlenden Zahlen lauten wie folgt:

n \ m	0	1	2	3	4
4	5	6	11	125	$2^{2^{65536}}-3$
3	4	5	9	61	$2^{65536}-3$
2	3	4	7	29	$2^{65536}-3$
1	2	3	5	13	65533
0	1	2	3	5	13

Die gegebenen Rekursionsformeln

(1) $A(0, n) = n + 1$ für $n \geq 0$

(2) $A(m, 0) = A(m-1, 1)$ für $m > 0$

(3) $A(m, n) = A(m-1, A(m, n-1))$ für $m > 0, n > 0$

definieren die Ackermann-Funktion, die wegen ihres extrem schnellen Wachstums berüchtigt ist. Aus den Formeln kann man die Werte der Spalte $m = 0$ sofort ablesen. Die Werte der Spalte $m = 1$ ergeben sich aus Formel (3) und (1) zu

$A(1, n) = A(0, A(1, n-1)) = A(1, n-1) + 1$,

und mit dem Anfangswert $A(1, 0) = A(0, 1) = 1 + 1 = 2$ erhält man daraus $A(1, n) = n + 2$.

Für die Spalte $m = 2$ erhält man

$A(2, n) = A(1, A(2, n-1)) = A(2, n-1) + 2$,

was zusammen mit dem Anfangswert

$A(2, 0) = A(1, 1) = 3$

die Formel $A(2, n) = 2n + 3$ liefert. Damit haben wir explizite Formeln für die bereits gegebenen Spalten gefunden.

Die nächste Spalte ($m = 3$) beginnt mit

$A(3, 0) = A(2, 1) = 5$.

In den weiteren Feldern steht

$A(3, n) = A(2, A(3, n-1)) = 2A(3, n-1) + 3$,

und über die Umformung

$A(3, n) + 3 = 2(A(3, n-1) + 3)$

erhalten wir hieraus die explizite Formel

$A(3, n) = 2^{n+3} - 3$

und damit die fehlenden Werte

$A(3, 3) = 61$ und $A(3, 4) = 125$.

Nun kommen grosse Zahlen ins Spiel: Die letzte Spalte (m=4) beginnt nämlich mit $A(4, 0) = A(3, 1) = 13$ und entwickelt sich dann gemäß

$A(4, n) = A(3, A(4, n-1)) = 2^{A(4, n-1)+3} - 3$.

Für die nächsten Felder erhalten wir somit

$A(4, 1) = 2^{A(4, 0)+3} - 3 = 2^{16} - 3 = 65\,533$,

$A(4, 2) = 2^{A(4, 1)+3} - 3 = 2^{65536} - 3$,

$A(4, 3) = 2^{A(4, 2)+3} - 3 = 2^{2^{65536}} - 3$,

und schließlich

$A(4, 4) = 2^{A(4, 3)+3} - 3 = 2^{2^{2^{65536}}} - 3$.

Diese letzte Zahl $A(4,4)$ hat ungefähr $10^{10^{19728}}$ Dezimalstellen. Schon die Zahl, die diese Stellenzahl angibt, hat 10^{19728} Ziffern! (Zum Vergleich dazu: Die Anzahl der Atome im Universum wird derzeit auf circa 10^{79} geschätzt.)

Die Gewinner der fünf Spektrum-Sweatshirts sind Gerhard Stenzel, München; H. Bachmann, Zürich; Helena Barbas, Kiel; David Elsaesser, Landau; und Lothar Suhr, Odenthal.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ Furchtlosigkeit in der Bewertung mancher Heiler: Spöttel scheitert an mangelnder Souveränität im Umgang mit dem Instrumentarium der (Natur-)Wissenschaften. Seine spannenden Analysen der Attraktivität unkonventioneller Angebote und seine profunden Kenntnisse der Wissenschafts- und Medizingeschichte können dieses Defizit nicht wirklich wettmachen.

So nutzt Spöttel vergleichsweise wenige naturwissenschaftlich-medizinische Originalquellen; manchmal beruft er sich auch nur auf solche, ohne sie genauer und nachvollziehbar zu benennen. Dies rückt seine Aussagen – ob zutreffend oder nicht – in die Nähe des alten Kinderlieds »Die Wissenschaft hat festgestellt«. Manchmal, wie beim Thema »Elektrosmog als Krebsrisiko«, ist Spöttel nicht auf dem aktuellen Stand, was der hochkomplexen Diskussion um diesen nach wie vor nicht endgültig einschätzbaren Risikofaktor nicht weiterhilft. Überwiegend zitiert der Autor Fakten aus populärwissenschaftlichen Werken und vor allem Medienberichten und packt zudem eigene, durchaus emotional gefärbte Kommentare hinzu.

Möglicherweise ist es die persönliche Betroffenheit, die dem Buch die notwendige Neutralität nimmt und zur Subjektivität schon bei der Auswahl der Themen und Quellen verleitet. Vor allem im letzten Drittel des Buchs wird deutlich spürbar, dass die Verarbeitung eigener Erfahrungen den Blickwinkel des Autors bestimmt. Zeitungsartikel und andere bereits von Journalisten gefilterte Informationen sind zur Untermauerung von Spöttels Aussagen aber eine zu dürftige Quelle, wenn es um Anbieter wie den selbst ernannten Vitaminguru Matthias Rath oder den Arzt Ryke Geerd Hamer und seine Germanische Neue Medizin geht, die keine Scheu davor haben, Kritiker unter Ausschöpfung aller juristischer Möglichkeiten zum Schweigen zu bringen.

Das Buch ist als Studie zum Phänomen Alternativmedizin lesenswert, aber in vielen Punkten nicht verlässlich genug, um tatsächlich eine Unterstützung bei der Bewertung der beschriebenen Angebote der Krebstherapie zu bieten.

Birgit Hiller

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin. Sie arbeitet im Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg.

Michael Spöttel
Vergebliche Hoffnung
Der Mythos von sanften und natürlichen Krebstherapien

Alibri, Aschaffenburg 2006.
158 Seiten, € 13,–

PREISRÄTSEL

Wie alt bin ich?

Von Helmut Karcher

Auf die Frage nach seinem Alter antwortete ein Mathematiker: »Ich war am $x.y.$ x^2y^2 genau xy Jahre alt. Ein nach mir (nicht am gleichen Tag) Geborener kann dies frühestens in genau 165 Jahren von sich sagen.«

Wie lautet das Geburtsdatum des Mathematikers? An welchem Datum hat er diese Aussage gemacht?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg oder per E-Mail an preisraetsel@spektrum.com. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zweimal das Buch »Lernen« von M. Spitzer. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 13. 02. 2007, eingehen. Unsere Preisrätsel finden Sie auch im Internet unter www.spektrum.de/preisraetsel.

Lösung zu »Rechenalbtraum« (Dezember 2006)

Die fehlenden Zahlen lauten wie folgt:

n \ m	0	1	2	3	4
4	5	6	11	125	$2^{2^{65536}}-3$
3	4	5	9	61	$2^{65536}-3$
2	3	4	7	29	$2^{65536}-3$
1	2	3	5	13	65533
0	1	2	3	5	13

Die gegebenen Rekursionsformeln

(1) $A(0, n) = n + 1$ für $n \geq 0$

(2) $A(m, 0) = A(m-1, 1)$ für $m > 0$

(3) $A(m, n) = A(m-1, A(m, n-1))$ für $m > 0, n > 0$

definieren die Ackermann-Funktion, die wegen ihres extrem schnellen Wachstums berüchtigt ist. Aus den Formeln kann man die Werte der Spalte $m = 0$ sofort ablesen. Die Werte der Spalte $m = 1$ ergeben sich aus Formel (3) und (1) zu

$A(1, n) = A(0, A(1, n-1)) = A(1, n-1) + 1$,

und mit dem Anfangswert $A(1, 0) = A(0, 1) = 1 + 1 = 2$ erhält man daraus $A(1, n) = n + 2$.

Für die Spalte $m = 2$ erhält man

$A(2, n) = A(1, A(2, n-1)) = A(2, n-1) + 2$,

was zusammen mit dem Anfangswert

$A(2, 0) = A(1, 1) = 3$

die Formel $A(2, n) = 2n + 3$ liefert. Damit haben wir explizite Formeln für die bereits gegebenen Spalten gefunden.

Die nächste Spalte ($m = 3$) beginnt mit

$A(3, 0) = A(2, 1) = 5$.

In den weiteren Feldern steht

$A(3, n) = A(2, A(3, n-1)) = 2A(3, n-1) + 3$,

und über die Umformung

$A(3, n) + 3 = 2(A(3, n-1) + 3)$

erhalten wir hieraus die explizite Formel

$A(3, n) = 2^{n+3} - 3$

und damit die fehlenden Werte

$A(3, 3) = 61$ und $A(3, 4) = 125$.

Nun kommen grosse Zahlen ins Spiel: Die letzte Spalte (m=4) beginnt nämlich mit $A(4, 0) = A(3, 1) = 13$ und entwickelt sich dann gemäß

$A(4, n) = A(3, A(4, n-1)) = 2^{A(4, n-1)+3} - 3$.

Für die nächsten Felder erhalten wir somit

$A(4, 1) = 2^{A(4, 0)+3} - 3 = 2^{16} - 3 = 65\,533$,

$A(4, 2) = 2^{A(4, 1)+3} - 3 = 2^{65536} - 3$,

$A(4, 3) = 2^{A(4, 2)+3} - 3 = 2^{2^{65536}} - 3$,

und schließlich

$A(4, 4) = 2^{A(4, 3)+3} - 3 = 2^{2^{2^{65536}}} - 3$.

Diese letzte Zahl $A(4,4)$ hat ungefähr $10^{10^{19728}}$ Dezimalstellen. Schon die Zahl, die diese Stellenzahl angibt, hat 10^{19728} Ziffern! (Zum Vergleich dazu: Die Anzahl der Atome im Universum wird derzeit auf circa 10^{79} geschätzt.)

Die Gewinner der fünf Spektrum-Sweatshirts sind Gerhard Stenzel, München; H. Bachmann, Zürich; Helena Barbas, Kiel; David Elsaesser, Landau; und Lothar Suhr, Odenthal.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

COMPUTERKUNST

Jos Leys – Meister der fraktalen Kunst

In Zusammenarbeit mit verschiedenen Forschern setzt der belgische Ingenieur die abstraktesten Erkenntnisse in spektakuläre Bilder um.

Von Christoph Pöppe

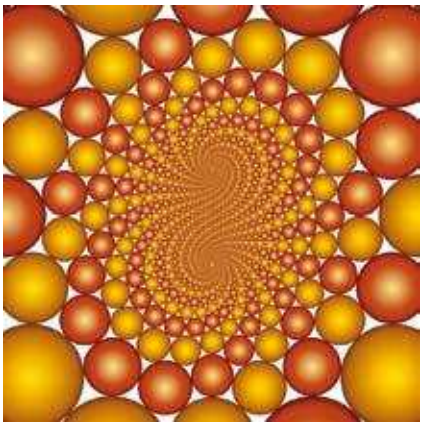
Auf den ersten Blick ist Jos Leys, ein 53-jähriger Ingenieur aus der Nähe von Antwerpen (Belgien), nur einer von mehr als hundert handverlesenen Künstlern, deren besonders bedeutende Fraktale, zu einem *infinite fractal loop* verknüpft, auf der Website http://www.fractalus.com/ifl/ zu finden sind. Auch die Tatsache, dass er als Hilfsmittel die vielseitige, im Netz erhältliche Software Ultrafractal verwendet, hebt ihn noch nicht aus der Masse hervor. Ungewöhnlich ist vielmehr, dass er über das populäre Thema »Fraktale« hinaus aktuelle mathematische Entwicklungen aufgreift und in Bilder umsetzt, die nicht nur den Sachverhalt erklären, sondern den Rang von Kunstwerken haben.

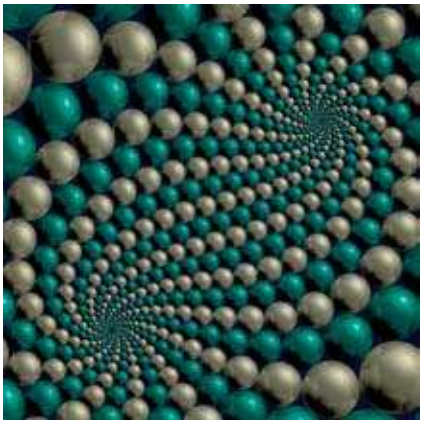
In Einzelfällen wirken seine Werke sogar auf die Wissenschaft zurück. Mathematiker nutzen zunehmend den Computer, um sich von gewissen Dingen, über die sie am Ende Theoreme beweisen wollen, erst einmal einen Überblick zu verschaffen – durch ziemlich konkrete Anschauung auf dem Bildschirm. Mittlerweile ist manch ein abstrakter Sachverhalt auf diesem Weg zuerst erkannt und erst im Nachhinein mit klassischen Mitteln bewiesen worden. Zu diesem Unterfangen leistet Jos Leys wesentliche Beiträge.

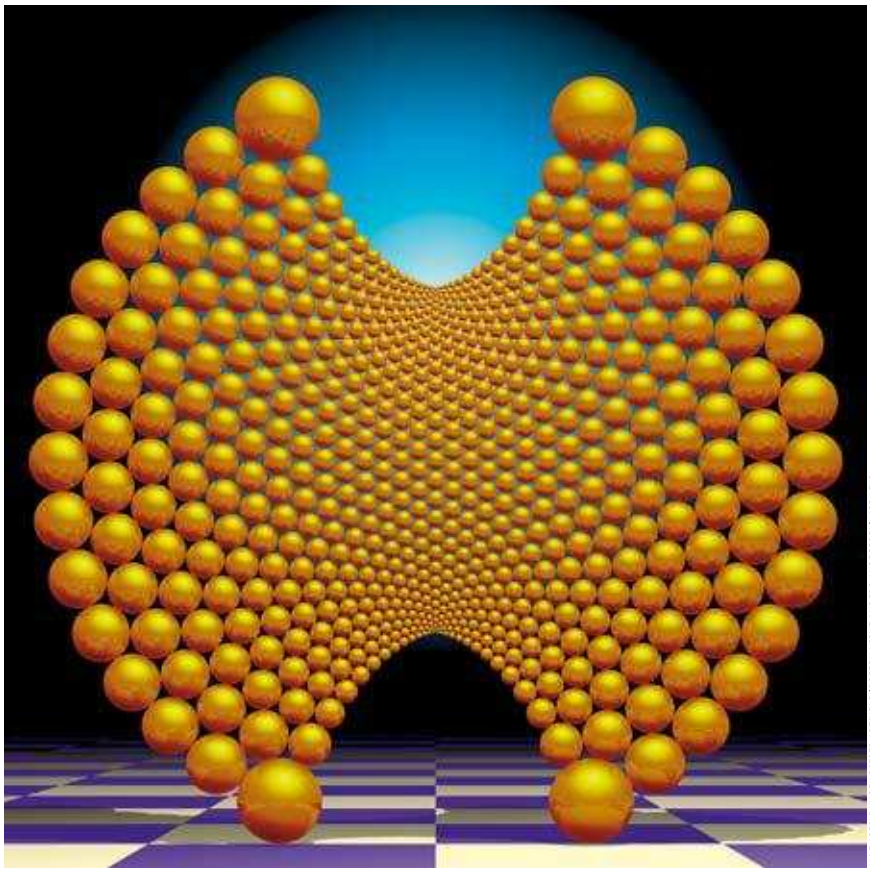
Ein spektakuläres Beispiel für diese Art experimenteller Mathematik sind die neueren Arbeiten über Klein'sche Gruppen von David Mumford, Caroline Series und David Wright. Auch hierzu hat Jos Leys eine Fülle ansprechender Bilder zu bieten.

Ein eher spielerisches Beispiel sind die hexagonalen Kreispackungen. Es geht darum, die Ebene mit Kreisen so zu füllen, dass sich benachbarte Kreise stets berühren. Für lauter gleich große Kreise ist das sehr einfach: Jeder Kreis hat genau sechs Nachbarn, und so machen das die Bienen auch.

Weniger bekannt ist, dass das auch mit ungleichen Kreise funktioniert. Um ▷





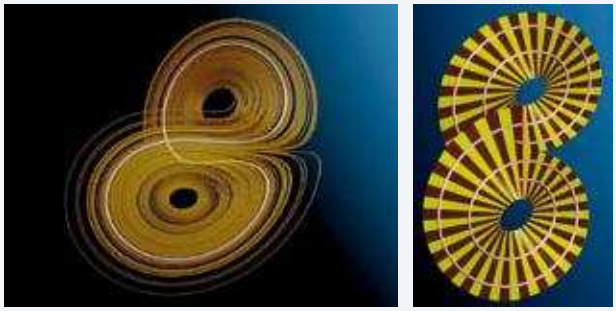


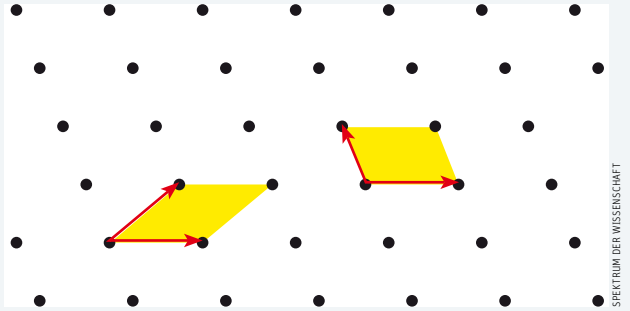
Aus einer Doyle'schen spiraligen Kreispackung hat Jos Leys durch Inversion am Kreis eine doppelt-spiralige gemacht (links oben). Noch schöner wurden seine Bilder dadurch, dass er die Kreise zu spiegelnden Kugeln veredelte (links unten) und ein anderes Spiralenmuster darüber hinaus räumlich deformierte (großes Bild).

ALLE ABBILDUNGEN DIESES ARTIKELS (SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN): JOS LEYS

▷ einen Kreis mit Radius 1 passen lückenlos sechs Kreise, deren Radien der Reihe nach a, b, b/a, $1/a$, $1/b$ und a/b betragen. Wenn darüber hinaus noch für gewisse natürliche Zahlen n und m die Gleichung $a^n = b^m$ gilt, lässt sich diese Anordnung zu einer unendlichen Kreispackung in der Ebene fortsetzen, ohne dass sich irgendwo Kreise überschneiden. Diese »Doyle'schen Spiralen« haben aus den verschiedensten Gründen viel Aufmerksamkeit gefunden (Kreispackungen sind ein Thema mit vielen Verzweigungen). Jos Leys hat diese hübschen Muster durch mathematische Transformationen und – von der Software bereitgestellte – Spiegelungseffekte noch erheblich veredelt (Bilder S. 105).

Vom Chaos zum Gitter: Überraschendes aus der Knotentheorie





Ein klassisches Thema der Chaostheorie ist der Lorenz-Attraktor (Bild oben, links). Das zugehörige Bewegungsgesetz (eine gewöhnliche Differenzialgleichung) veranlasst einen Punkt im dreidimensionalen Raum, sich in die Nähe der merkwürdigen »Schmetterlingsflügel« zu begeben und dort für alle Zeiten herumzuwandern, in unvorhersagbarer Weise von einem Flügel zum anderen wechselnd. Für spezielle Anfangspositionen ergibt sich eine periodische Bahn, das heißt, der Punkt durchläuft eine geschlossene Kurve immer wieder (hervorgehoben im obigen Bild).

Die Topologen bezeichnen geschlossene Kurven im Raum als »Knoten« und scheren sich nicht um deren genaue Lage, so als wäre die periodische Bahn des Punkts ein ringförmiges Stück Schnur, das man beliebig manipulieren darf; nur Aufschneiden und Wiederzusammenfügen sind verboten. Erstaunlicherweise liefert diese etwas eingeschränkte Sicht der Dinge wertvolle Auskünfte.

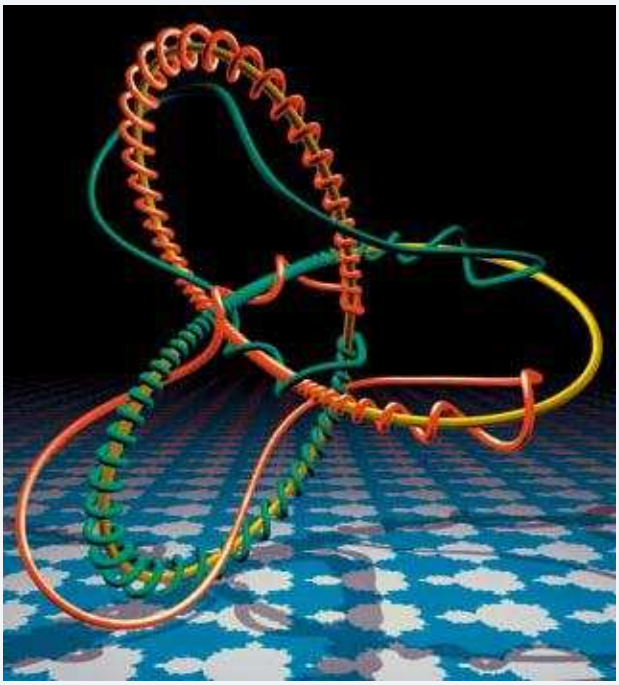
So darf man, wenn man sich die Freiheit nimmt, die Bahnen etwas zu deformieren, die schwierige Dynamik des Lorenz-Systems durch eine einfachere ersetzen (Bild oben, Mitte): Von einer Strecke (rot, in der Bildmitte) gehen nach rechts zwei Papierstreifen ab, einer oben, einer unten. Die beiden Streifen ersetzen die Flügel des Lorenz-Attraktors. Sie verlaufen irgendwie durch den Raum und werden dabei allmählich breiter, bis sie beide, auf die doppelte Breite angewachsen, wieder von links in die Strecke einmünden – als zwei übereinanderliegende Blätter Papier. Der Punkt bewegt sich auf den Papieren strikt in Längsrichtung, wobei er deren Verbreiterung mitmacht. Im Effekt kommt ein Punkt, der in der Entfernung x, vom unteren Endpunkt der Strecke aus gemessen, die Strecke verlässt, in der Enfernung $2x$ zurück – allerdings modulo der Streckenlänge, das heißt, man nimmt $2x$ minus der Streckenlänge statt $2x$, wenn der Punkt nach oben davonzulaufen droht.

Eine andere Klasse mathematischer Objekte hat auf den ersten Blick rein gar nichts mit dem Lorenz-Attraktor zu tun: Gitter in der Ebene. Man nehme zwei Vektoren und dazu alle Punkte, die man aus dem Nullpunkt durch beliebig häufiges Verschieben mit diesen Vektoren erzeugen kann (Bild oben, rechts).

Wenn man die erzeugenden Vektoren verändert, bewegt sich das gesamte Gitter. Aber Deformationen eines Gitters sind durch Bewegungen der erzeugenden Vektoren nur unvollkommen zu beschreiben. Durch manche Deformationen wird ein Gitter auf sich selbst abgebildet, nicht aber die erzeugenden Vektoren, denn verschiedene Vektorenpaare können, wie im Bild angegeben, dasselbe Gitter beschreiben.

Nach verschiedenen Umformungen stellt sich heraus: Am besten stellt man ein Gitter als Punkt dar, der in einem dreidimensionalen Raum mit Ausnahme eines Kleeblattknotens liegt. Die Deformation eines Gitters entspricht der Bahn eines Punkts in diesem Raum, und wenn das Gitter seine ursprüngliche Form wieder annimmt, ist es eine geschlossene Bahn – ein Knoten, der sich irgendwie um den Kleeblattknoten windet (Bild unten).

Überraschenderweise sind diese Knoten (bis auf Deformationen) identisch mit den oben beschriebenen Knoten (periodischen Bahnen) des Lorenz-Attraktors.



Dem niederländischen Mathematiker Hendrik W. Lenstra ist es gelungen, ein Werk seines Landsmanns, des Zeichners Maurits C. Escher (1898–1972), nachzubessern. In »Bildgalerie« (»Prententoonstelling«, 1956) betrachtet ein Mensch ein Bild einer Landschaft, zu der er irgendwie selbst gehört; nur musste Escher in der Mitte seines Werks noch einen weißen Fleck lassen. Lenstra entwickelte in Fortführung von Eschers Ideen eine Methode, die Lücke mit einer unendlichen Spirale zu füllen. Dieses Verfahren hat Jos Leys zu einer Methode erweitert, beliebig viele andere Bilder mit Spiralstruktur und Unendlichkeit zugleich auszustatten (Kasten auf dieser Seite).

Den »Ritterschlag« der *mathematical community* erhielt Jos Leys auf dem Internationalen Mathematikerkongress in Madrid im vergangenen August. Étienne Ghys von der École normale supérieure in Lyon hat einen überraschenden Zusammenhang zwischen zwei eigentlich weit entfernten Gegenständen der Mathematik aufgedeckt: einerseits dem Lorenz-Attraktor, jener merkwürdigen, unendlich vielblättrigen Teilmenge des dreidimensionalen Raums, der alle Lösungen einer gewissen Differenzialgleichung zustreben und die deswegen zu einem Lieblingsobjekt der Chaostheoretiker geworden ist; andererseits den unendlichen regelmäßigen Gittern in der Ebene (Kasten S. 106).

Die Verbindung verläuft über ein drittes Gebiet, die Knotentheorie; das einzusehen erfordert zumindest in Bezug auf die Gitter einen nicht ganz einfachen Abstraktionsprozess. Aber nachdem die Gegenstände beider Theorien zu Knoten in einem dreidimensionalen Raum verwandelt wurden, sind sie von geradezu handgreiflicher Anschaulichkeit.

Nur ist es aussichtslos, die Äquivalenz zweier solcher Knoten nachprüfen zu wollen, indem man mit echten Schnüren herumfummelt. Da hilft die von Jos Leys erarbeitete visuelle Darstellung.

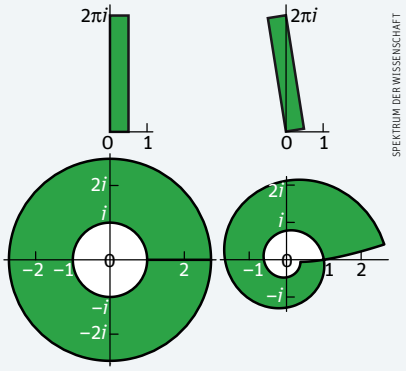
In einem Hauptvortrag auf dem genannten Kongress hat Étienne Ghys vor den Augen des staunenden Publikums die Knoten tanzen lassen. Eine schriftliche Fassung mit bewegten Bildern findet sich auf der Website von Jos Leys, die noch viele andere schöne Dinge zu bieten hat. ◁

Die Exponentialfunktion als Abbildungshilfe

Die berühmte Formel $e^{2\pi i}=1$ erweist ihre Nützlichkeit, wenn es darum geht, Spiralbilder der besonderen Art zu konstruieren. Da auch $e^0=1$ ist, bildet die (komplexe) Exponentialfunktion die beiden komplexen Zahlen 0 und $2\pi i$ auf dieselbe Zahl ab: die Eins. Was dazwischen ist, landet auf dem Umfang eines Kreises. Ein achsenparalleles Rechteck mit der Höhe 2π (links oben im Bild rechts) wird zu einem Kreisring (links unten).

Mit derartigen Rechtecken kann man die Ebene pflastern. Obere und untere Nachbarn unseres Rechtecks werden auf denselben Kreisring abgebildet. Aus einem rechten Nachbarn wird ein größerer Ring, der den bisherigen genau umschließt, aus einem linken Nachbarn ein präzise eingepasster Kreisring.

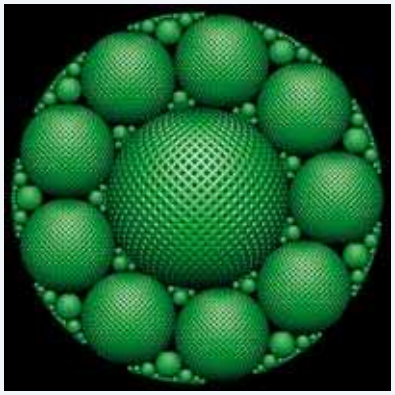
Wenn man das Rechteck kippt und etwas verkleinert, sodass 0 und $2\pi i$ gegenüberliegende Ecken werden (rechts oben), ist das Bild unter der Exponentialfunktion ein Schneckenstück (darunter). Aber auch mit gekippten Rechtecken kann man die Ebene pflastern.

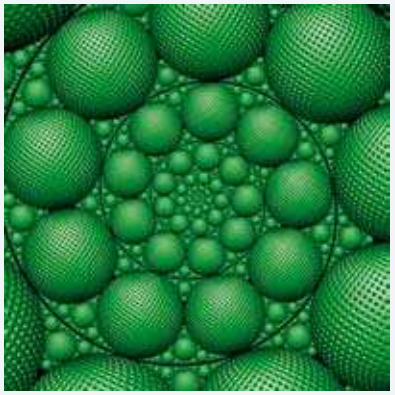


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Man nehme einen Kreisring und deformiere ihn durch Anwendung des Logarithmus (der Umkehrung der Exponentialfunktion) zu einem Rechteck, dessen Ober- und Unterkante aneinanderpassen. Dann pflastere man die komplexe Ebene mit gekippten Exemplaren des Rechtecks, wende die Exponentialfunktion an – und die Schneckenstücke fügen sich zu einer lückenlosen, im Prinzip unendlichen Spirale (Bildpaar unten).

Das Verfahren ist von Kreisringen auf rechteckige Rahmen erweiterbar (Bildpaar ganz unten).





Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR UND LITERATUR

Jos Leys, un artiste géomètre. Von Jean-Paul Delahaye in: Pour la Science, April 2006, S. 90

Indra's Pearls. The Vision of Felix Klein. Von David Mumford, Caroline Series und David Wright. Cambridge University Press, Cambridge 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/860744.

Terroristensuche in Telefonnetzen?

Supercomputer durchforsten täglich Milliarden von Anrufen und Internetnachrichten. Kombiniert mit Graphentheorie und Bekanntschaftsanalysen könnten, so glaubt unser Autor, auch konspirative Gruppen aufgespürt werden.

Von Brian Hayes

»Was lässt sich aus Billionen von Telefonaten und E-Mails herausfiltern?«

Seit jenem schrecklichen Dienstagmorgen vor über fünf Jahren, als entführte Flugzeuge in das World Trade Center und das Pentagon stürzten, herrscht in Amerika eine unterschwellige Stimmung aus Sorge und Misstrauen. Es gibt natürlich Angst vor weiteren Anschlägen. Es gibt aber auch Bedenken, dass Maßnahmen, die solchen Attacken vorbeugen, individuelle Rechte und Freiheiten einschränken könnten. Im letzten Jahr gab es eine kontroverse Diskussion, nachdem bekannt geworden war, dass US-Behörden Internetverbindungen, Telefongespräche und finanzielle Transaktionen überwachen. Einige der Überwachungsprogramme sollen angeblich permanent gigantische Datenmengen durchforsten und nach Mustern suchen, die den Verdacht auf kriminelle Pläne oder Aktivitäten nahelegen.

Die Debatte über diese Programme kreist vorwiegend um rechtliche und politische Fragen. Werden verfassungsrechtliche Schutzbestimmungen hinreichend berücksichtigt? Wie sieht es aus mit Gesetzen, die Geheimdiensten verbieten, Bürger auszuspionieren? Gelingt den Überwachungsprogrammen der Balanceakt zwischen dem Recht auf Privatsphäre einerseits und dem Sicherheitsbedürfnis der Allgemeinheit andererseits? Das sind wichtige Themen, aber ich möchte sie anderen überlassen. Hier möchte ich folgender Frage nachgehen: Was kann man aus solchen umfassenden Überwachungs- und Datenauswertungsprogrammen lernen? Besitzen die Kommunikationsmuster der Terroristen so spezifische Merkmale, dass Überwachungsprogramme die konspirativen Verbindungen aus Billionen von Telefonaten oder E-Mail-Nachrichten ausfiltern können?

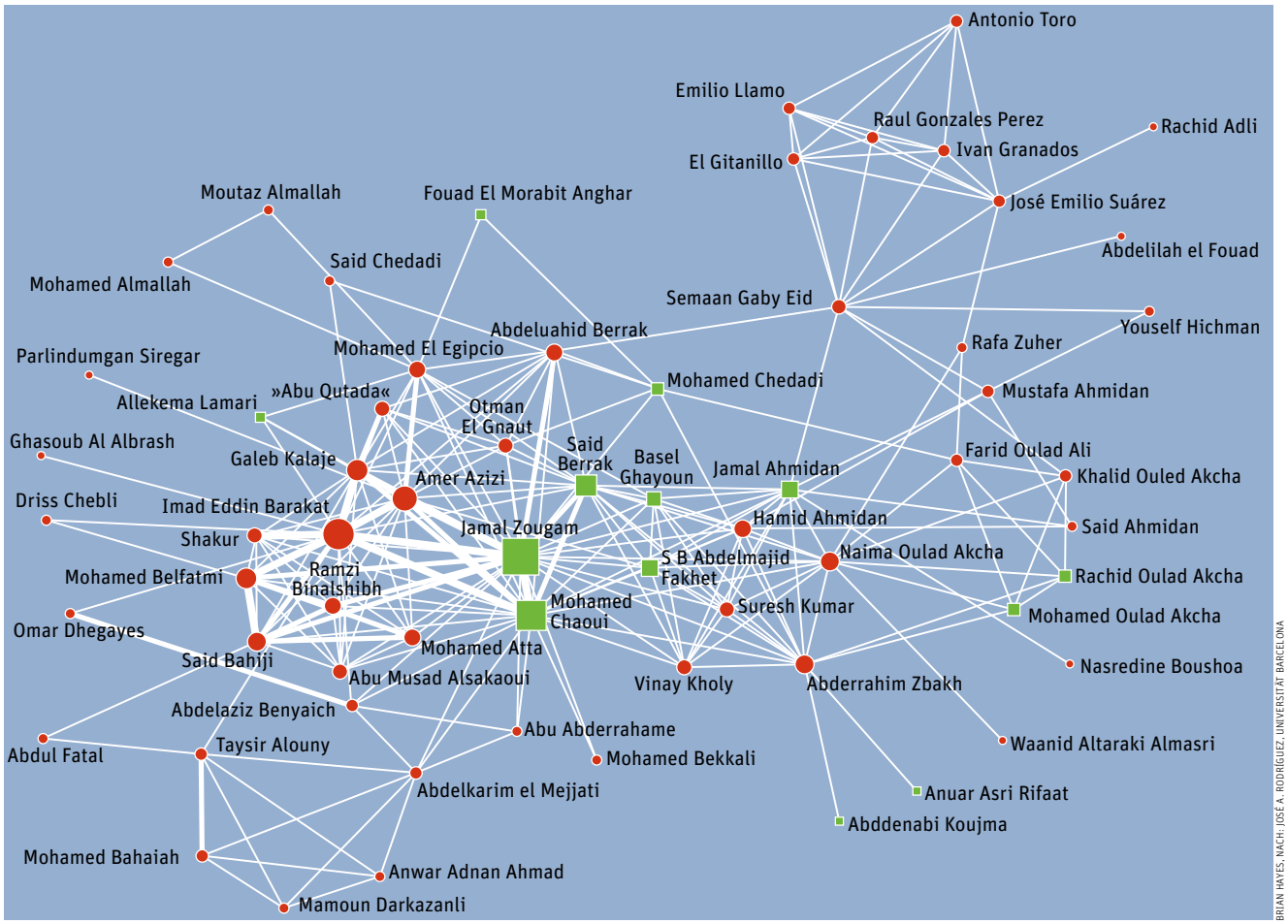
Die Beantwortung dieser Fragen stößt offenbar auf Schwierigkeiten. Bislang wurden nur sehr wenig verlässliche Informationen über Eigenschaften und Umfang solcher Software öffentlich bekannt. Mathematiker und Informatiker haben sich allerdings mit Problemen beschäftigt, die denen eines Geheimagenten ähneln, der Überwachungsdaten auswerten soll. Auch Sozialwissenschaftler interessieren sich schon seit Langem für die sozialen Netzwerke, die Personen miteinander verbinden. Vielleicht hilft ja die Kombination beider Disziplinen, um einige plausible Vermutungen anzustellen.

Die im letzten Jahr bekannt gewordenen Überwachungsprogramme scheinen einige sehr spezielle Aufgaben lösen zu können. Dazu zählen Lauschangriffe, bei denen jemand beispielsweise Telefongespräche abhört oder Inhalte von Internet- und E-Mail-Nachrichten aufzeichnet. Eine »Folge-dem-Geld«-Software sammelt Informationen aus Bankgeschäften. Am faszinierendsten aber finde ich Berichte über ein Projekt, bei dem eine Datenbank von Telefongesprächen analysiert werden soll, um Verbindungen zwischen Verschwörern aufzudecken.

Telefonate im Gesprächsgraphen

Diese Datenbank enthält keine Gesprächsaufzeichnungen oder sonstigen Informationen, welche die Inhalte der Gespräche verraten; sie enthält lediglich die Verbindungsdaten: die Telefonnummern der beiden jeweiligen Gesprächsteilnehmer sowie Datum, Uhrzeit und Gesprächsdauer.

Diese Gesprächsdatenbank kam mir gleich bekannt vor. Vor einigen Jahren hatte ich von Experimenten mit einem ähnlichen Datenspeicher gelesen – fast sicher einer früheren Version von der, die jetzt angeblich die Regierung testet. Die numerischen Experimente waren Algorithmentests im mathematischen Gebiet der Graphentheorie zur Analyse netzwerkartiger Strukturen. Die Telefongesprächs-



BRIAN HAYES, NACH: JOSÉ A. RODRÍGUEZ, UNIVERSITÄT BARCELONA

datenbank stellte dafür ein nützliches Testobjekt dar, da sie als riesiger mathematischer Graph betrachtet werden kann.

Erste Erwähnungen dieser Datenbank, auch »Gesprächsgraph« genannt, finden sich in den Medien. Danach hätten »Techniker (der National Security Agency NSA) bestimmte Gespräche belauscht und große Mengen von Verbindungsdaten aus Telefonaten und Internetverkehr nach Mustern durchsucht, mit denen sich Terrorismusverdächtige aufspüren lassen«.

Die NSA ist der amerikanische Spionagedienst und zuständig für Kryptografie-Belange und Signalüberwachung. Obwohl sein Budget und seine personelle Besetzung geheim sind, wird oft behauptet, er sei der größte amerikanische Überwachungsdienst und zugleich der größte Arbeitgeber für Mathematiker, womöglich weltweit.

Die Untersuchung des Graphen obliegt einem Zweig des Bereichs Signalüberwachung, die für »Verkehrsanalyse« bekannt ist. In einem Krieg kann die Situation eintreten, dass man Funksignale des Feindes auffängt, aber sich der verschlüsselte Inhalt nicht dechiffrieren lässt. Doch dabei kann es bereits erhellend sein, die Anzahl der Nachrichten zu zählen. Ein Schwall von Nachrichten signalisiert vielleicht eine kurz bevorstehende Truppenbewegung. Ein plötzlicher Nachrichtenstopp wirkt sogar noch bedrohlicher. Wenn es gelingt, die Quelle und den Empfänger jeder Nachricht zu ermitteln – wobei de facto ein Gesprächsgraph erstellt wird –, lässt sich sogar noch mehr herauskriegen. Denn auch die Kommunikationswege liefern oft Hinweise auf die Organisation der militärischen Einheiten.

Die Suche nach verräterischen Mustern in Telefongesprächen könnte sich ähnliche Prinzipien zu Nutze machen, ist aber weitaus schwieriger. In Kriegslagen sind Nachrichten zwischen feindlichen Einheiten leicht als solche identifizierbar. In einer Gesprächsdatenbank indes können Gespräche zwischen ein paar Dutzend Verschwörern leicht im Meer der anderen Gespräche untergehen.

Einträge in der Gesprächsdatenbank dienen nicht der Verbesserung der nationalen Sicherheit, sondern schlicht kommerziellen Zwecken. Damit der Anschlussinhaber am Ende jedes Monats eine detaillierte Abrechnung erhalten kann, muss eine Telefongesellschaft Daten für jedes zu Stande gekommene ▷

Diese Netzwerkkarte veranschaulicht die Verbindungen zwischen Personen, die am 11. März 2004 an der Bombardierung der Pendlerzüge in Madrid beteiligt waren, und ihren Helfershelfern. Grüne Quadrate kennzeichnen die eigentlichen Bombenleger. Rote Kreise stehen für die Mitverschwörer. Weiße Linien zwischen den Knoten verbinden einerseits Personen, die miteinander verwandt sind, oder andererseits Personen, die oft einen Laden aufsuchten, der einem der Verschwörer gehörte.

▷ Telefongespräch erfassen – die Nummer des Anrufers, des Angerufenen sowie die Zeiten von Gesprächsanfang und seinem Ende. Die größten Telefongesellschaften haben pro Tag ein Gesprächsaufkommen von rund 250 Millionen gebührenpflichtigen Telefonaten. Daher fallen dort monatlich mehrere Milliarden Gesprächsdaten an. Die US-Telefongesellschaft AT&T berichtet, dass ihre Datenbank gespeicherter Gesprächsinformationen über zwei Billionen Datensätze enthält; das entspricht mehr als 300 Terabyte an Daten.

Der Gesprächsgraph dient außer zur Rechnungserstellung auch noch anderen firmeninternen Zwecken – die sich teils nicht sehr von denen der NSA unterscheiden und fast genauso geheim gehalten werden. Mit älteren Gesprächsdaten lassen sich Betrügereien aufdecken, andere Muster sind für Marketingaktionen von Interesse. Offeriert eine Firma etwa Vergünstigungen bei Gesprächen für eine bestimmte Zielgruppe, kann die Grapheninformation als Grundlage einer Kosten-Nutzen-Analyse dienen.

Im Prinzip lassen sich Verbindungsdaten wie die der Telefonate auch für andere Kommunikationsdienste erstellen. So speichern etwa Federal Express und andere Kurierdienste ihre Auftragsdaten digital. Daraus ließen sich leicht Datenbänke von Sendern und Empfängern erzeugen. Kurioserweise bietet das digitale Medium schlechthin – das Internet – keine Möglichkeit, Daten, wer mit wem kommuniziert, routinemäßig festzuhalten. Es gibt dafür keinen direkten Bedarf, weil Kunden für E-Mails eben nichts bezahlen müssen. Doch sehe ich keine prinzipiellen Hürden, um detaillierte Statistiken zu E-Mails oder anderen Arten des Internetverkehrs zu erstellen. Ein »Paket-Schnüffler«, der am Zentralrechner des Netzwerks installiert wird, müsste dazu lediglich die Kopfzeilen der Nachrichten sowie die »an«- und »von«-Adresseinträge speichern. (Es ist sogar denkbar, dass Geräte, welche die NSA in Schaltzentralen des Internets installiert hat, genau diesem Zweck dienen.)

Sich in Gesprächsgraphen zu vertiefen gerät zur Zahlenfresserei. Will man einen Berg von hunderten Terabyte von unzusammengehörigen Daten durcharbeiten, so ist dies das digitale Äquivalent zu einer Großbaustelle. Bevor sich Baggerschaufeln in Bewegung setzen, sollten wir uns klarmachen, wonach wir eigentlich suchen. Welche Kommunikationsmuster sind typisch für Terroristen und ihre Helfershelfer?

Gute Ansprechpartner für solche Fragen sind Wissenschaftler, die soziale Netzwerke studieren – also Strukturen von Gruppen, die durch ihre Verbindungen untereinander charakterisiert sind. Natürlich bildet auch die Gruppe der Sozialen-Netzwerk-Forscher selbst ein soziales Netzwerk.

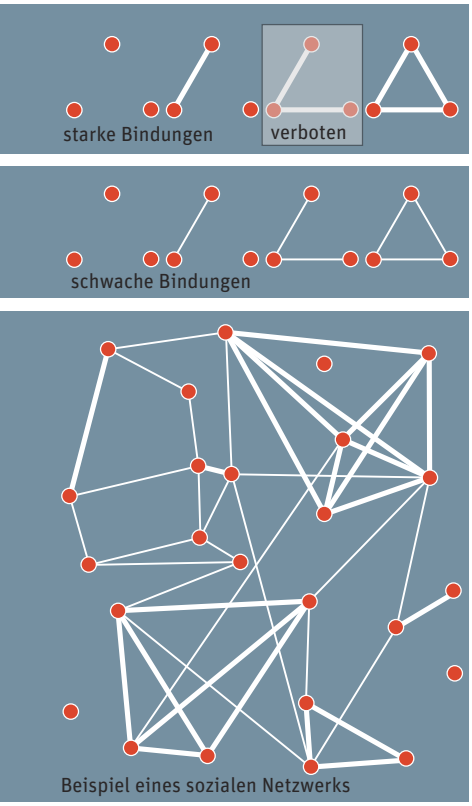
Einen grundlegenden Artikel zu diesem Thema veröffentlichte 1973 der heute an der Stanford-Universität tätige Mark S. Granovetter unter dem Titel »Die Stärke schwacher Verbindungen«. Ihm war aufgefallen, dass bei Leuten, die eng miteinander vernetzt sind – etwa nahe Freunde, Familienmitglieder oder Arbeitskollegen –, die Stärke der Verbindungen meist symmetrisch ist und dass sie einer Regel gehorchen, die man Dreiseitigkeit nennen könnte. Symmetrie bedeutet: Wenn A ein Freund von B ist, dann ist B auch ein Freund von A. Dreiseitigkeit besagt: Wenn A mit B und C befreundet ist, sind vermutlich auch B und C miteinander befreundet. Dabei handelt es sich natürlich nur um Wahrscheinlichkeiten, und jedem fallen sofort Gegenbeispiele ein: unerwiderte Liebe, gestörte Dreiecksbeziehungen. Doch für Analysezwecke ist es sinnvoll zu fragen, wie eine Gesellschaft aussehen würde, in der Symmetrie und Dreiseitigkeit streng gültig wären. Die Antwort lautet, dass die Sozialstruktur dann ausschließlich aus perfekten Cliquen bestünde – Gruppen, in denen jeder mit jedem verbunden ist.

Was die Welt zusammenhält

Starke Bindungen zwischen Individuen liefern den Klebstoff für sozialen Zusammenhalt. Doch nach Granovetters Theorie gibt es einen paradoxen Effekt. Lokal erzeugen enge Verbindungen sehr stabile Strukturen; weiträumiger betrachtet lassen sie jedoch auch voneinander isolierte Gruppen entstehen. Wegen der Alles-oder-nichts-Natur enger Beziehungen werden die Gruppen zu Inseln, die kaum miteinander kommunizieren. Was indes die Welt wirklich zusammenhält, meint Granovetter, sind die schwachen Bindungen im erweiterten Bekanntenkreis. Solche Freundschaften sind häufig symmetrisch, aber selten »dreieckig«. Man kann mit dem Kundenbetreuer bei der Bank jede Woche ein Gespräch führen, ohne alle dessen anderen Bankkunden kennen zu lernen. Solche schwachen Verbindungen, die auf den ersten Blick sozial nicht bedeutsam erscheinen, schaffen jedoch zwischen den Cliquen wichtige Querverbindungen. Die Sozialstruktur einer Gesellschaft besteht laut Granovetter aus Clustern von Personen, die intern miteinander stark verbunden sind und extern mit anderen Clustern lose.

Die Theorie der sozialen Netzwerke besitzt deutliche Parallelen zur mathematischen Graphentheorie – obwohl Menschen, die in diesen beiden Fachgebieten arbeiten, Cluster bilden, die nur schwach miteinander verbunden

Die Dreiseitigkeitsregel von Mark Granovetter besagt, dass Leute, die einen gemeinsamen Freund haben, wahrscheinlich auch selbst miteinander befreundet sind. Granovetters Modell erhebt dieses Prinzip zu einer strikten Regel – aber nur für den Fall starker sozialer Bindungen. Leute, die stark miteinander verbunden sind, bilden oft Cliquen – also Subnetzwerke, in denen jeder mit jedem verbunden ist.



sind. Graphentheorie besitzt ihre eigene Nomenklatur und beschreibt ihre Studienobjekte reichlich abstrakt. Formal betrachtet besteht ein Graph aus einer Menge aus Knoten und Kanten, wobei jede Kante zwei Knoten miteinander verbindet. Diese Definition kann auf verschiedene Weise interpretiert werden. In der Praxis jedoch lässt sich feststellen, dass sowohl Graphentheoretiker als auch Netzwerktheoretiker mit Diagrammen aus Punkten und Linien arbeiten.

Was verraten uns die Prinzipien der Netzwerktheorie und der Graphentheorie über die Struktur von Terroristenzellen? Schon das Wort »Zelle« gibt einen Anhaltspunkt – es suggeriert Unterteilung. Und in der Tat ist die Welt der Spionageringe und Terroristen für ihre limitierte Kommunikation bekannt. Denn alles andere würde gefangen genommene Gruppenmitglieder nur in Gefahr bringen. Gleichzeitig jedoch müssen sie untereinander in Kontakt bleiben, um Pläne schmieden und ausführen zu können.

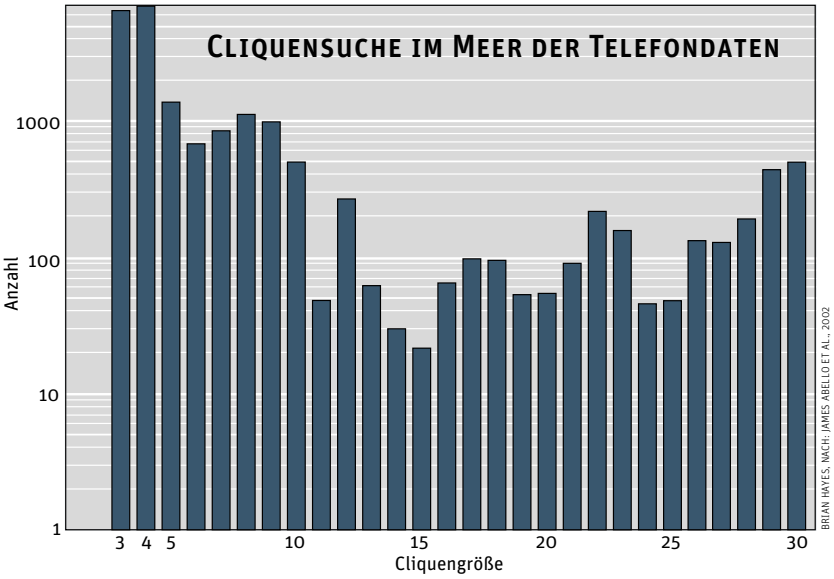
Eine erhellende Fallstudie stammt aus einem völlig anderen Bereich: Preisabsprachen bei US-Herstellern von Elektrogeräten in den 1950er Jahren. Das soziale Netzwerk heimlich sich absprechender Manager und Firmenchefs untersuchten Wayne E. Baker von der Universität von Chicago und Robert R. Faulkner von der Universität von Massachusetts. Sie fanden, dass »die Struktur der illegalen Netzwerke vor allem durch die Notwendigkeit maximaler Geheimhaltung geprägt ist, weniger durch Maximierung der Effizienz«. Freilich konnten die Preis- und Angebotsabsprachen nicht ohne Kommunikation zwischen den Beteiligten in die Wege geleitet werden – besonders bei großen Geräten. Trotz aller Risiken mussten sich die Chefs gelegentlich auch persönlich treffen, um ihre Pläne zu koordinieren.

Terroristennetzwerke unterliegen offenbar den gleichen paradoxen Zwängen. Valdis E. Krebs, der Netzwerkanalysen für die Lösung wirtschaftlicher Probleme nutzt, hat mit der gleichen Methode die Verbindungen zwischen den Flugzeugentführern vom 11. September 2001 untersucht. Eine Studie, die er wenige Wochen nach den Attacken durchführte, ergab ein überraschend »dünnes« Terroristen-Netzwerk. Zwar war jeder Entführer mit jedem anderen über einige Wege vernetzt, doch viele dieser Wege waren sehr lang und liefen über drei oder vier Mittelsmänner. Diese dünne Struktur machte die Kommunikation sehr ineffizient (siehe SdW 11/2002, S. 88).

Später, als mehr Informationen zur Verfügung standen, revidierte Krebs seine Analyse. Er hat die neue »Verbindungslandkarte« auch auf seiner Webseite http://orgnet.com/prevent.html veröffentlicht – und kommt nun zu anderen Schlussfolgerungen. Krebs wies nach, dass man, ausgehend von zwei Männern, die bereits im Januar 2000 unter Terrorverdacht standen, über bekannte Verbindung zu allen 19 Entführern gelangt – und außerdem zu weiteren Verschwörern. Jeder Knoten des Netzwerks ist mit den beiden Anfangsverdächtigen entweder direkt oder durch einen einzigen Mittelsmann verbunden.

José A. Rodríguez von der Universität Barcelona hat für die Terroristen, die am 11. März 2004 in Madrid Bombenattentate auf Pendlerzüge verübten, eine ähnliche Netzwerkkarte angelegt. Rodríguez deckte zwischen den Verschwörern mehrere Varianten starker Verbindungen auf. Einige waren miteinander verwandt oder schon seit ihrer Kindheit befreundet; einige stammten aus dem Umfeld eines Ladens, der einem der beiden Täter gehörte; einige waren bereits an früheren Anschlägen oder Terrorattacken beteiligt. Rodríguez untersuchte anfangs nur die 13 Männer, welche die Sprengsätze selbst gelegt und gezündet hatten, und ging dabei starken Verbindungen nach, was ein etwas seltsames Netzwerk erzeugte. Ein harter Kern aus sechs Leuten firmierte als Clique: Jeder war mit jedem anderen verbunden. Die übrigen Mitglieder waren mit der Hauptgruppe nur lose verbunden oder standen mit ihr gar nicht in Verbindung.

Das Bild änderte sich völlig, als Rodríguez rund 70 in unterschiedlicher Weise mit den Attentaten assoziierte Personen untersuchte und sowohl schwache als auch starke Verbindungen berücksichtigte. Die schwachen Verbindungen schlossen Leute ein, die an Finanztransaktionen partizipierten, den Tätern nur flüchtig begegneten oder Ähnliches. Das grö- ▷



Suche nach Gruppen in einer riesigen Datenbank aus Telefonverbindungen: Eine Clique besteht hier aus einem Datensatz von Telefonnummern. Dabei war während eines bestimmten Zeitraums jede Nummer mindestens einmal mit jeder anderen verbunden. Die Grafik zeigt Cliquen mit 3 bis 30 Mitgliedern, wie sie in 170 Millionen Telefonverbindungen eines einzigen Tages entdeckt wurden.

»Geheimdienste hätten die Attentäter des 11. September 2001 aufspüren können«

▷ ßere und vollständigere Netzwerk entspricht sehr viel stärker dem, was Granovetters Theorie erwarten lässt. Es gibt mehrere dichte Cluster, in denen die meisten Knoten stark miteinander verbunden sind; doch diese Cluster kommunizieren untereinander über relativ lose und unzuverlässige Verbindungen. So bilden etwa die Spanier, welche die Attentäter mit den Explosivstoffen versorgt hatten, einen eigenen Cluster; die meisten Verbindungen zwischen dieser Untergruppe zum Rest des Netzwerks laufen durch einen einfachen Knoten – eine ziemlich wackelige Verbindung.

Die oben beschriebenen sozialen Netzwerke wurden hinterher rekonstruiert. Ausgangspunkt waren komplette Listen der bekannten Gruppenmitglieder und ihrer biografischen Daten. Solche Strukturen bereits im Vorfeld aufzudecken – in einer Zeitspanne, wenn die Attacken sich noch in der Planung befinden und die meisten Attentäter unbekannt sind – wäre ungleich schwieriger gewesen, insbesondere wenn man mit nicht personenspezifischen Daten wie Telefon- oder E-Mail-Listen arbeitet.

Die Enthüllung eines Attentatsplans im Vorfeld – durch Datenanalyse

Solche Netzwerke auszukundschaften, das fällt klar in den Kompetenzbereich der NSA – was deren Interesse an Gesprächsgraphen erklären könnte. Ein Szenario ist leicht vorstellbar: Eine Person gerät durch bestimmte Informationen unter Verdacht und die NSA erfährt durch Auswertung ihrer Gesprächsgraphen, mit wem diese Person in den letzten Wochen und Monaten telefoniert hat. Das Ergebnis wäre ein Ring aus Kontakten, der den Verdächtigen umgibt. Dann wird jeder dieser Kontakte in gleicher Weise untersucht, was einen zweiten Ring von Kontaktpersonen zweiter Ordnung ergibt. Dies ließe sich noch weiter fortführen, aber wegen des exponentiellen Wachstums des Graphen würde der Ring dann schnell den größten Teil der Bevölkerung umfassen (insbesondere wenn die Person Anrufe von Telefonwerbern erhielt oder auch mal eine Pizza bestellte). Interessanter sind Kontaktpersonen, die ebenfalls untereinander in Verbindung stehen, da solche Dreiseitigkeit die stärksten Verbindungen kennzeichnet.

Der schwierigste Part der Netzwerkanalyse besteht nicht darin, diese Verbindungen aufzuspüren, sondern festzustellen, welche davon bedeutsam sind. Es ist denkbar, dass Geheimdienste – ausgehend von den beiden seit Januar 2000 bekannten Verdächtigen – Verbindungen zu allen Attentätern vom 11. September 2001 hätten aufspüren können, wenn sie ihr Wissen systematisch genutzt hätten. Doch tausende andere Personen wären dann ebenfalls unter Verdacht geraten. Es bringt also wenig, das Netzwerk der Verschwörer isoliert zu betrachten; der Graph ist de facto in eine viele größere Struktur eingebettet.

Will man die Verbindungen zwischen bekannten Verdächtigen nachverfolgen, so wäre der direkte Zugriff auf deren Gesprächsgraphen hilfreich, aber er ist nicht notwendig. Bei namentlich bekannten Personen könnte die Herausgabe der Gesprächsdaten auf gesetzlichem Wege erwirkt werden, wie es bei Strafverfolgungsbehörden gängige Praxis ist. Würde der Gesprächsgraph mit seinen 10^{12} Datensätzen nur daraufhin durchforstet, die paar hundert oder paar tausend relevanten Gespräche herauszusuchen, erschiene der Aufwand in der Tat unangemessen hoch.

Aktuelle Berichte in den Medien lassen jedoch vermuten, dass Gesprächsgraphen weit interessantere Informationen liefern können: Damit lassen sich nicht nur die Kontaktpersonen bekannter Terroristen aufspüren, sondern auch ein konspirativer Attentatsplan im Vorfeld enthüllen – einfach indem die Datenbestände nach Mustern durchsucht werden, die auf Verdächtige hindeuten. Das hört sich vielleicht wie Magie an: Man wirft einen Blick auf das riesige und komplizierte Gebilde des Gesprächsgraphen und sieht – ohne auch nur die Namen der Anschlussinhaber zu kennen – einige Verbindungsmuster, die als Gefahrensignale gewertet werden können. Lässt sich dieser Trick von der Welt der Magie in die Welt der Algorithmen übertragen?

Wenn solche typischen Muster existieren, legen die Erkenntnisse der Netzwerktheorie nahe, dass sie bestimmte Kombinationen aus starken und schwachen Verbindungen enthalten. Eine Terroristenzelle kann auf Grund spezieller Gesprächsmuster als eine Gruppe von Leuten gekennzeichnet werden, die viel miteinander telefonieren, aber dem Rest der Welt wenig mitzuteilen haben. Daher ist das Alarm auslösende Muster ein dichter Subgraph, der relativ isoliert von seiner Umgebung auftritt.

Nur die NSA selbst weiß, ob es möglich ist, solche Muster tatsächlich auszumachen. Doch man kann stellvertretend ein etwas simpleres Problem betrachten, um die Schwierigkeit der Aufgabe abzuschätzen. Dieses simplere Problem besteht darin, eine große Clique innerhalb eines Gesprächsgraphen aufzuspüren. An der Lösung versuchte sich Ende der 1990er Jahre ein Team um James Abello, der damals an den AT&T Bell Laboratories tätig war.

Die größte Clique in einem Graph zu finden ist ein typisches »schweres Problem«. Nach der Brute-force-Methode (gemeint ist

hier rohe Rechenkraft) untersucht man dazu einfach jede mögliche Untereinheit von Knoten und prüft, ob sie jeweils alle miteinander verbunden sind. Die Zahl von Untereinheiten wächst dabei so schnell, dass der Algorithmus schon bei einem Graphen aus 50 Knoten stecken bleibt. Bei 50 Millionen Knoten beispielsweise wäre sein Einsatz schlicht unmöglich. Die einzig praktikable Alternative sind Annäherungen und probabilistische Methoden, die meist eine gute Näherung finden, aber nicht unbedingt garantieren können, dass sie auch die optimale Lösung darstellen.

14 000 Cliquen mit 30 Mitgliedern

Der in Abellos Experiment benutzte Graph umfasst die Einträge eines einzigen Tages. Er hatte 53 767 087 Knoten (entspricht der Zahl der Telefonnummern) und mehr als 170 Millionen Kanten (entspricht der Zahl der Anrufe). Der Algorithmus begann mit einer kleinen Clique und versuchte, daraus eine größere zu konstruieren. In der Anfangsphase suchte das Programm wiederholt nach neuen Knoten, die mit allen bereits gefundenen verbunden waren. Wenn keine neuen Knoten, die diese Bedingung erfüllen, mehr entdeckt wurden, wechselte das Programm die Suchstrategie. Nun versuchte es, einen Knoten zu entfernen und dafür zwei andere neu dazuzubekommen. Um den kompletten Datensatz eines einzigen Tages zu durchsuchen, benötigte das Programm, das auf einem Rechner mit vier Prozessoren und vier Gigabyte Arbeitsspeicher lief, rund fünf Stunden.

Die größte gefundene Clique besaß 30 Knoten. Überlegen Sie mal, was das bedeutet: Eine Gruppe von 30 Telefonanschlüssen war dadurch gekennzeichnet, dass im Lauf eines einzigen Tages von jedem Anschluss aus alle anderen 29 Nummern angerufen wurden oder dieser von den anderen, was sich zu mindestens 435 Anrufen summiert – ein äußerst eifriger Telefonzirkel! Aber es gab nicht nur eine solche Clique. Abellos Team spürte über 14 000 Cliquen aus 30 Knoten aus.

Das erstaunliche Ergebnis dieses Experiments erlaubt mehrere vorläufige Schlüsse. Erstens steht die Rechenkraft zum Analysieren eines Gesprächsgraphen jederzeit zur Verfügung – wenn auch nicht gerade auf jedem Aldi-Tischrechner. Abello konnte bei seinen Analysen den Datensatz eines ganzen Tages durchforsten; heutige Computer könnten sicherlich noch größere Datenmengen bewältigen.

Zweitens bereitet es offenbar kein Problem, Beispiele eines vorgegebenen Musters im Gesprächsgraphen aufzuspüren. Das Problem besteht darin, ein Muster zu definieren, das selektiv genug ist, um eine Zielgruppe zu entdecken, ohne gleichzeitig 14 000 andere ins Visier zu nehmen. Der Algorithmus muss auf irgendeine Weise einige Dutzend potenzielle Terroristen von anderen Gruppen ähnlicher Größe und Struktur unterscheiden, die lediglich ein Familientreffen organisieren, die Nachbarschaft nach einer entlaufenen Katze absuchen, eine Ratsversammlung einberufen oder um die Wette telefonieren, um Gratis-Konzerttickets von einem Radiosender zu erhalten.

Egal mit welchem Verfahren dieses Problem angegangen wird – die Geheimdienste stehen vor einer gewaltigen Aufgabe: Sie müssen eine riesige Population (bis zur gesamten, über sechs Milliarden Personen umfassenden Menschheit) nach einer winzigen Untergruppe (die Gewalttaten plant) durchforsten.

Der Mathematiker James Abello merkt aber an, dass aus den Graphen auch noch andere Informationen extrahiert werden können. So existieren einige Cliquen für mehrere Tage, andere verschwinden rasch wieder. Informationen dieser Art können helfen, die Gruppen gegeneinander abzugrenzen. Abello zitiert auch neue Studien, die sich zum Ziel gesetzt haben, selbst organisierte Gemeinschaften in anderen Umfeldern zu identifizieren: von den Mitgliedern von Chat-Gruppen bis hin zu E-Bay-Kunden.

Es liegt in der Natur von Geheimdienstprogrammen, dass sie geheim sind. Dennoch kann das, was die Regierung im Geheimen möglicherweise tut, nicht allein ihr überlassen werden. Meine eigene Meinung habe ich mir bislang noch nicht abschließend gebildet. Terroristen mittels eines Gesprächsgraphen aufzuspüren erscheint mir als sehr schwierige Aufgabe. Aber das bedeutet ja nicht, dass sie nicht gelöst werden kann!

Gesprächsgraphen könnten nicht nur versteckte Terrorzellen aufspüren, sondern auch bei anderen Fahndungsaufgaben hilfreich sein. Hier ein Beispiel: Die Bush-Regierung hat ihren Unwillen darüber bekundet, dass die Öffentlichkeit von allen neuen Überwachungsprogrammen Kenntnis erhalten hat, und wüsste gern, über welches Schlupfloch dieses Wissen nach außen gelangte. Der Gesprächsgraph könnte das ideale Werkzeug zur Beantwortung auch solcher Fragen sein. Man muss zum einen nur alle Personen auflisten, die Zugang zu diesen Informationen hatten, und zum anderen die Journalisten, die darüber berichteten. Dann muss man diesen Graphen nach direkten und indirekten Verbindungen zwischen den beiden Knotensätzen durchsuchen. Das Kuriose ist, dass derjenige, der die Information preisgab, sicherlich sehr genau wusste, wie weit er sich damit aus dem Fenster lehnte. ◁

Brian Hayes ist Mathematiker und Redakteur von American Scientist.

© American Scientist
www.americanscientist.org

Graph mining: laws, generators, and algorithms. Von D. Chakrabarti und C. Faloutsos in: ACM Computing Surveys, Bd. 38, S. 1, 2006

The March 11th terrorist network. Von J. A. Rodríguez in: EPP-LEA, Nr. 3 (Vorabdruck), 2005

Massive quasi-clique detection. Von J. Abello et al. in: LATIN 2002. Lecture Notes in Computer Science, Bd. 2286, S. 598, Berlin, Springer-Verlag 2002

Mapping networks of terrorist cells. Von V. E. Krebs in: Connections, Bd. 24(3), S. 43, 2001

Weblinks finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/862186.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Das Geheimnis der Empathie

Erst dank so genannter Spiegelneuronen konnte der Mensch seine Kultur entwickeln. Diese besondere Klasse von Nervenzellen ermöglicht Einfühlung, Nachahmung und soziales Verstehen

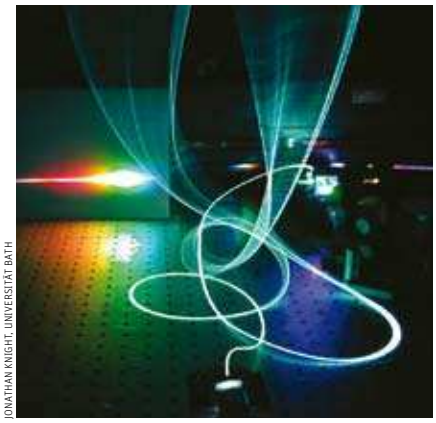
FOTO: CARY WOLINSKI, BEARBEITUNG: JEN CHRISTIANSEN

WEITERE THEMEN IM MÄRZ

Roboter im Haushalt

Vom autonomen Rasenmäher bis zum metallenen Altenpfleger: Bald könnten mechanische Wesen uns lästige Pflichten abnehmen – schreibt Microsoft-Gründer Bill Gates in seinem exklusiven Beitrag

LEGO GROUP 2004



JONATHAN KNIGHT, UNIVERSITÄT BATH

Weißes Laserlicht

Der Superkontinuum-Laser erzeugt intensive Lichtblitze, deren Spektrum sich über ein breites Frequenzband erstreckt. Diese »weißen« Strahlungspulse ermöglichen ungeahnt präzise Zeitmessungen sowie die Übertragung gewaltiger Datenmengen

NATIONAL PARK SERVICE, USA

Tod aus der Tiefe

Statt Meteoriteneinschlägen oder Vulkankatastrophen lösten nach einer neuen Theorie umkippende Ozeane große Artensterben aus – zumindest in einigen Fällen